

# **Abschlussbericht**

## **geomatrix.bw, Teil 2: Prozessmodellierung und Chancenanalyse oberflächennaher Erdwärme in Baden-Württemberg**

Valentin Wagner, Philipp Blum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Angewandte Geowissenschaften

Förderkennzeichen ZO4E 28003 + ZO4E28004

Laufzeit: 1.9.2009 – 31.5.2012

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Programms „Herausforderung Erdwärme“ mit Mitteln aus der Zukunftsoffensive IV des Landes Baden-Württemberg finanziert.

August 2012

# Inhalt

Danksagung.....	3
1 Einleitung.....	4
2 Grundlagen.....	4
3 Offene Systeme.....	5
3.1 Testfeld Kilchberg.....	5
3.1.1 Übersicht.....	5
3.1.2 Analytische Modelle.....	11
3.1.2.1 Ansatz Rauch (1992).....	11
3.1.2.2 Ansatz Ingerle (1988).....	14
3.1.2.3 Ansatz Leitfaden (2009).....	16
3.1.3 Numerisches Modell.....	17
3.1.4 Berechnung.....	20
3.1.4.1 Analytische Berechnungen.....	20
3.1.4.2 Numerische Berechnungen.....	21
3.1.5 Zusammenfassung und Fazit.....	23
4 Geschlossene Systeme.....	24
4.1 Testfeld Vegas.....	24
4.1.1 Überblick.....	24
4.1.2 Analytische Modelle.....	25
4.1.3 Numerisches Modell.....	25
4.1.4 Berechnungen.....	27
4.1.5 Zusammenfassung und Fazit.....	30
4.2 Testfeld Bad Wurzach.....	30
4.2.1 Überblick.....	30
4.2.2 Analytische Modelle.....	34
4.2.3 Numerisches Modell.....	34
4.2.4 Berechnung.....	36
4.2.4.1 Analytische Berechnungen.....	36
4.2.4.2 Numerische Berechnungen.....	37
4.2.5 Zusammenfassung und Fazit.....	37
5 Zusammenfassung und Fazit.....	38
6 Referenzen.....	38
7 Anlage.....	40

## Danksagung

Wir möchten uns bei Gita Brandstetter (Universität Tübingen), Marc Berner (Universität Tübingen), Jens Wallisch (Universität Tübingen) und Burkhard Cless (ETH Zürich) für ihre Mitarbeit im Rahmen von Diplom- bzw. MSc-Arbeiten an diesem Projekt recht herzlich bedanken.

Ebenfalls danken wir Petra Linder für ihre Mithilfe bei der Bewältigung der administrativen Aufgaben. Des Weiteren möchten wir uns bei allen Kooperationspartnern der Hochschule für Technik Stuttgart (HFT) und der Universität Stuttgart, Abteilung VEGAS, für ihre Zusammenarbeit bedanken. Ebenfalls möchten wir uns bei der Firma Baugrund Süd und Herrn Helmar Engel für die freundliche Zusammenarbeit bedanken. Zuletzt wollen wir uns auch bei Herrn Stefan Wigger und Frau Gerda Bugislaus für ihre Zusammenarbeit und bei allen Gutachtern für die konstruktive Kritik bedanken.

# 1 Einleitung

Das Forschungsprojekt „geomatrix.bw, Teil 2: Prozessmodellierung und Chancenanalyse oberflächennaher Erdwärme in Baden-Württemberg“ hatte zum Ziel, in enger Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern der Hochschule für Technik Stuttgart (HFT) und der Universität Stuttgart, Abteilung VEGAS, die Auswirkungen von geothermischen Systemen auf den Untergrund mittels detaillierter Simulationen und mithilfe von Testfeldern zu untersuchen (Abb. 1).

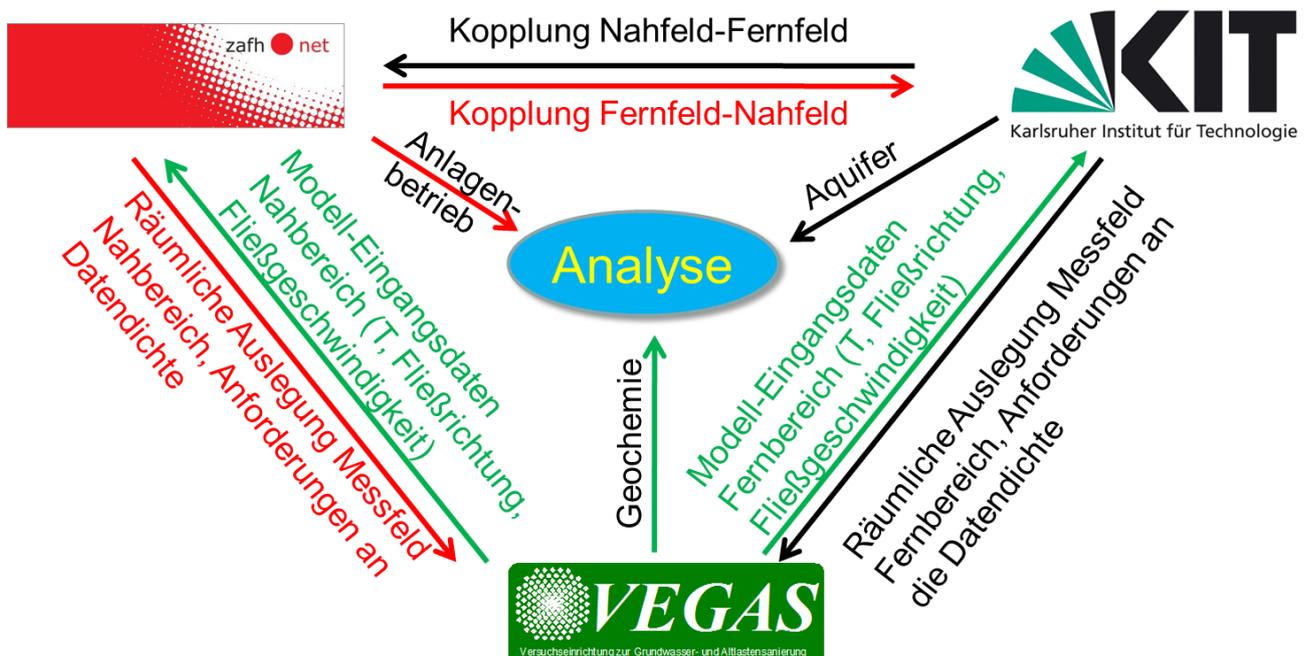


Abbildung 1: Aufbau des Verbundprojektes "geomatrix.bw"

## 2 Grundlagen

Die oberflächennahe Geothermie erfreut sich immer größer werdender Beliebtheit, da unter anderem die Kosten fossiler Rohstoffe steigen oder durch den Einsatz dieser Technik zusätzlich CO<sub>2</sub> Emissionen vermieden werden können (Blum et al., 2010; 2011). Bei der Nutzung der oberflächennahen Geothermie kommt ein dreiteiliges System zum Einsatz, das aus Wärmequelle, -pumpe und -senke besteht (Abbildung 2). Die Wärmequelle versucht thermische Energie aus dem Untergrund für die Wärmepumpe verfügbar zu machen. Wärmequellen können generell auf Grund ihrer Entzugsart in offene und geschlossene Systeme unterschieden werden. Offene Systeme, zum Beispiel geothermische Brunnenanlagen bzw. Grundwasserwärmepumpenanlagen, zeichnen sich durch eine stoffliche und energetische Interaktion der Wärmepumpenanlage mit dem Untergrund aus. Über den Brunnen (Wärmequelle) wird Grundwasser gefördert und direkt zum Energieaustausch in Kontakt mit der Wärmepumpe gebracht. Dagegen kommt es bei den geschlossenen Systemen (z.B. Erdwärmesonde) zu einem reinen Energieaustausch zwischen der Gesamtanlage und dem Untergrund. Ein Wärmeträgerfluid, das im

thermischen Kontakt mit der Wärmepumpe steht, zirkuliert innerhalb eines abgeschlossenen Rohrsystems durch den Untergrund und das Gebäude.

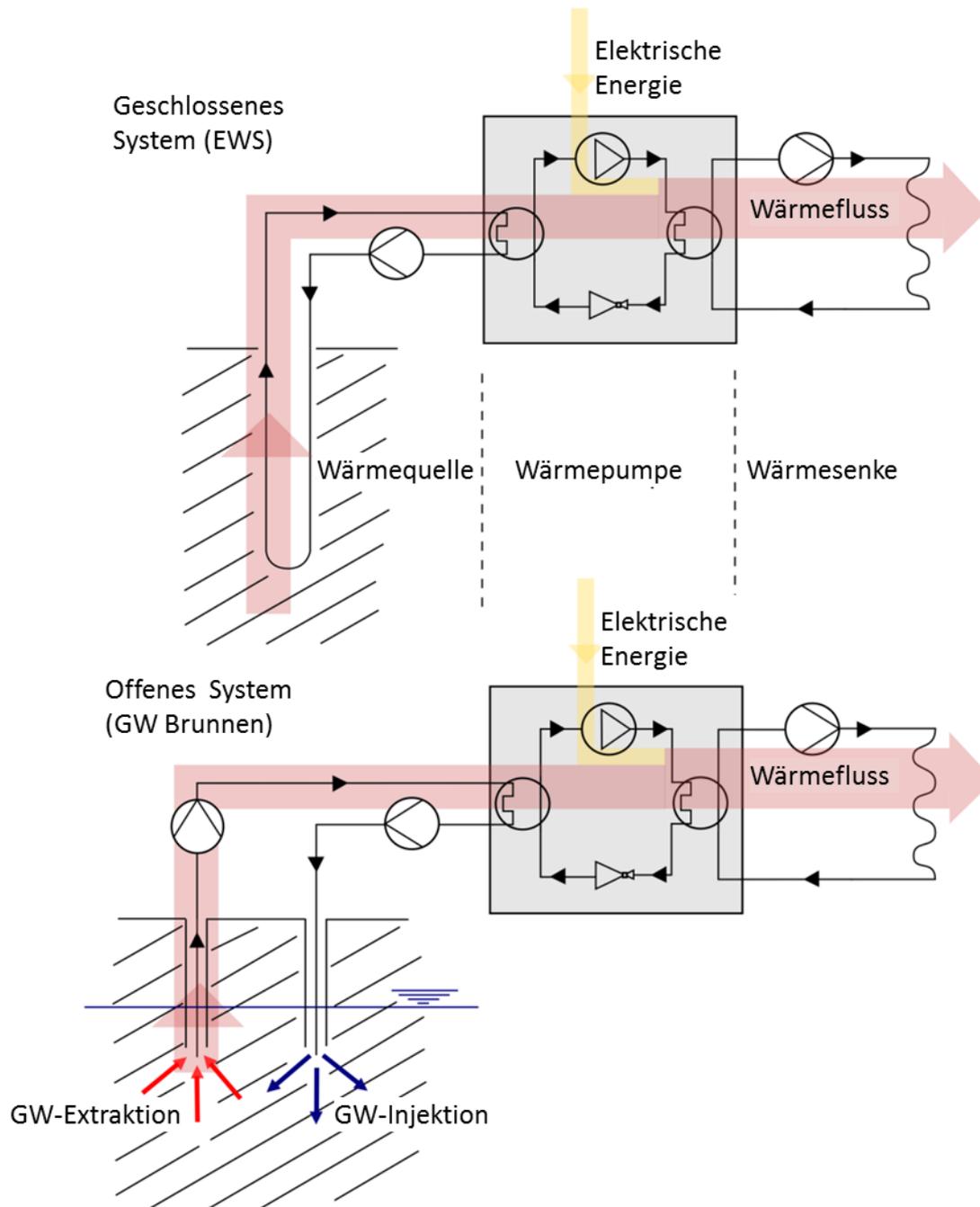


Abbildung 2: Überblick über oberflächennahe geothermische geschlossene und offene Systeme.

### 3 Offene Systeme

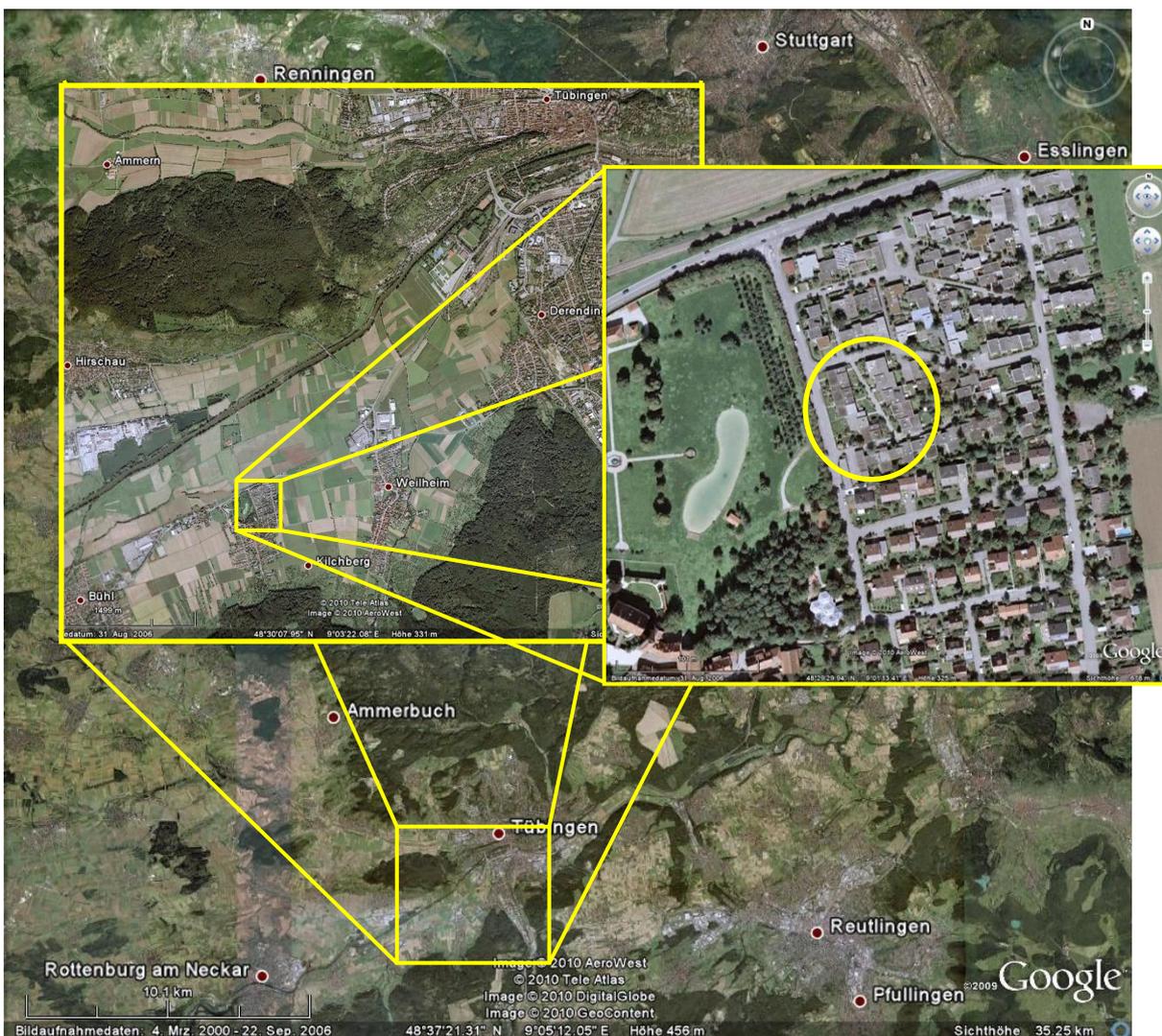
#### 3.1 Testfeld Kilchberg

##### 3.1.1 Übersicht

Das für diese Studie betrachtete Gebiet liegt in Kilchberg, einer kleinen Gemeinde mit ca. 1300 Einwohnern, 5 Kilometer südwestlich von Tübingen in Baden-Württemberg

(Abbildung 3). Hier wird die langfristige thermale Auswirkung eines monovalenten Grundwasserheizsystems mithilfe von Temperaturmessungen in sieben Überwachungsbrunnen untersucht. Die möglichen Langzeitauswirkungen sind hier besonders gut zu ermitteln, da diese Anlage bereits 1979 gebaut und seit 1980 in Betrieb ist.

Kilchberg grenzt südlich an den Höhenzug des Rammert und wird im Norden durch den Neckar sowie den Spitzberg begrenzt. Es liegt also in der Neckartalaue zwischen Rottenburg und Tübingen. Hier steht der sogenannte Auelehm an, der erst wenige 100 Jahre alt ist, da der Neckar erst seit Ende des 19. Jahrhunderts wirtschaftlich genutzt wird (Kleinert, 1976).



**Abbildung 3: Geographische Lage des Testfeldes (verändert nach Google Earth).**

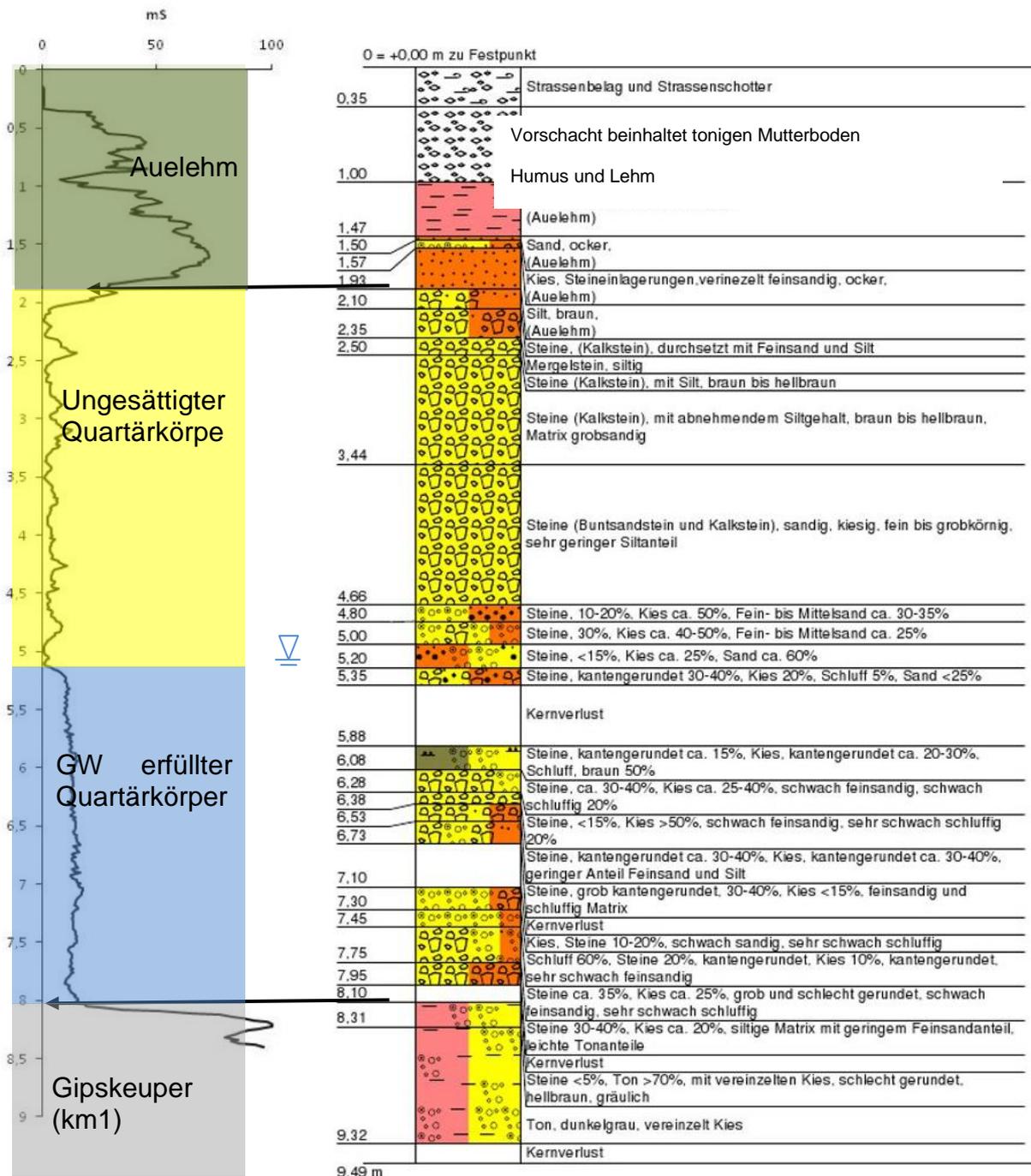
Die wirtschaftliche Nutzung des Neckars führte zu Begradigungen des Flußbetts und zum Bau von Stauwehren. Der Auelehm ist im Bereich Kilchbergs zwischen einem und zwei Meter mächtig und bildet die erste Versickerungsschicht im unbebautem Gebiet (Kleinert, 1976). Darunter befindet sich die sogenannte Niederterrasse aus Hangschutt, verschwemmtem Verwitterungslehm und Fließerdern des südlich gelegenen Rammert aus dem Pleistozän. Während der Würmeiszeit tauten die Hänge des Rammert in den Sommermonaten teilweise auf und es kam zu Solifluktion mit Ablagerungen unter anderem in diesem Bereich (Kleinert, 1976). Hierdurch wurde der Verlauf des Neckars

nach Norden verlagert und das z.T. tiefe Rinnensystem des damals mäandrierenden Neckars mit Schottern aus dem mittleren Keuper verfüllt. Diese bestehen nach Bohrprofilen in den oberen zwei bis drei Meter aus Kiesen, die mit Tonen und Sand verfüllt sind. Darunter folgen weitere drei bis fünf Meter mit sandigen Kiesen. Nach Kleinert (1976) bestehen diese zu je ungefähr 10% aus Ton/Silt und Sand und zu knapp 80% aus Kiesen.

Während der Installation des Testfeldes wurden Kernproben genommen, aus denen das in Abbildung 4 gezeigte Profil erstellt wurde. Hier steht der Auelehm bis in eine Tiefe von 2,10 m unter Geländeoberkante (GOK) an. Der heute vom Grundwasser ungesättigte Bereich bis ungefähr 4,70 m unter GOK ist überwiegend steinig mit Komponenten aus Kalkstein und grobkiesigem Buntsandstein, was den Verlauf des Neckars widerspiegelt. Die Buntsandsteinanteile stammen vermutlich aus dem Bereich um Horb a.N., wo der Neckar den Buntsandstein des Schwarzwaldes anschneidet. Er fließt weiter in Richtung Rottenburg, wo er Material des Muschelkalks aufnimmt. Die Komponenten sind mit siltigem bis feinsandigem Material verfüllt, allerdings ist die Matrix korngestützt. Da die Kalksteine kantengerundet bis angerundet und die Buntsandsteine angerundet beziehungsweise gerundet sind und somit fluviatil transportiert wurden, handelt es sich bei diesen Steinen um Schwemmmaterial. Es stammt vermutlich aus einem Flutereignis im Rahmen der sommerlichen Erwärmung der letzten Eiszeit, da es einen großen Anteil an großen Komponenten in diesem Bereich gibt und somit die Transportenergie des Wassers hoch gewesen sein muss.

Der Kiesanteil steigt im gesättigten Bereich mit starken Schwankungen auf über 50% Volumenanteil an. Die Kiese sind ebenfalls kantengerundet und angerundet und mit Feinsand, teilweise Mittelsand, verfüllt. Bei 7,30 m findet sich eine ungefähr 15 cm mächtige Siltablagerung mit steinigen und kiesigen Komponenten, die auf eine geringe Strömung hindeutet, wobei die steinigen und kiesigen Komponenten sich später eingelagert haben können. Der gesamte Quartärkörper endet bei 8,10 m unter GOK. Hier beginnt die Formation des Gipskeupers (km1) mit verwitterten dunkelgrauen bis schwärzlichen Tonen und einzelnen kiesigen Komponenten. Die Einteilung des tonigen Auelehms, den ungesättigten und gesättigten Neckarkiesen und dem Gipskeuper sind ebenfalls deutlich in der während einer Bohrung durchgeführten Leitfähigkeitsmessung zu sehen (Abbildung 4).

Der hier vorliegende Kiesgrundwasserleiter ist der höchstgelegene Grundwasserleiter und wird darunter durch den als undurchlässig anzusehenden Gipskeuper begrenzt (Kleinert, 1976). Darunter befindet sich als nächster Grundwasserleiter die Schicht des Lettenkeupers (Kluftwasserleiter) gefolgt vom Oberen Muschelkalk (Karst-/Kluftwasserleiter), beide haben für diese Arbeit allerdings keine Bedeutung.

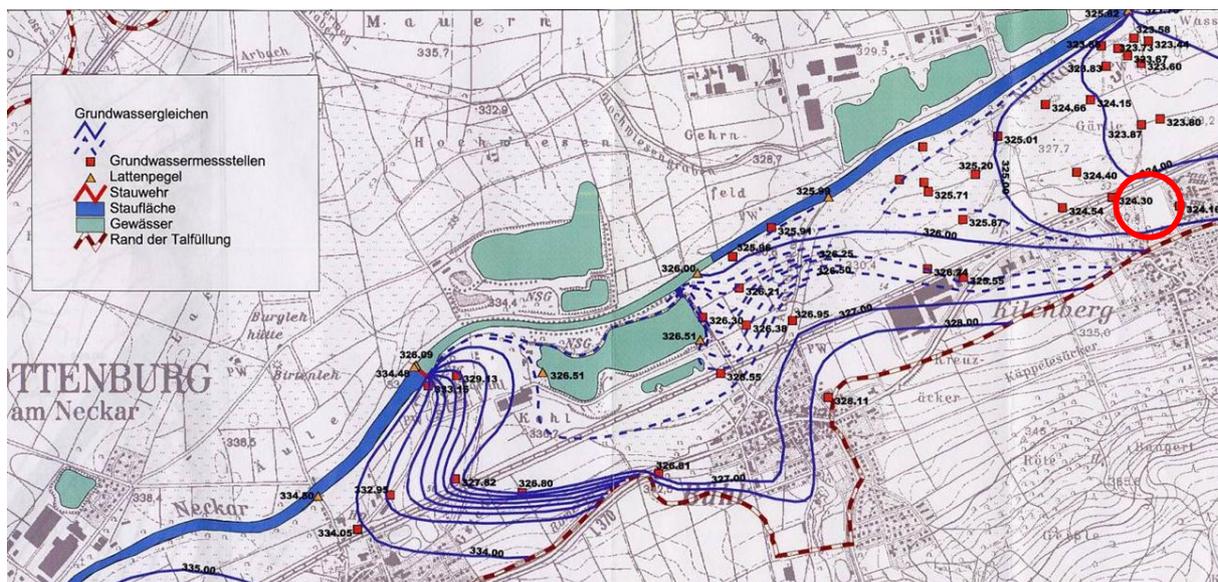


**Abbildung 4: Schichtprofil nach DIN 4022 und 4023 aus Rammkernsondierung und Profil der geoelektrischen Widerstandsmessung (Bohrungen E4 und E5).**

Das Grundwasser im Kiesgrundwasserleiter liegt ungespannt vor. Der Flurabstand des Grundwassers im Bereich Kilchberg variiert mit der Entfernung zum Neckar. Im Norden Kilchbergs ist der Kieskörper tiefer und der Flurabstand des Grundwassers liegt nach eigenen Messungen im Sommer 2009 bei durchschnittlich 5,5 m unter GOK. Im südlicheren Bereich Kilchbergs zur Grenze des durch den Rammert anstehenden Grundgesteins des mittleren Keupers wird der Kieskörper flacher und der Flurabstand des Grundwassers liegt ebenfalls nach eigenen Messungen im Sommer 2009 bei ungefähr 4 m.

Der hydraulische Gradient unterliegt hierbei nur geringen Schwankungen und liegt im Mittel bei 6 ‰ (Kleinert, 1976). Die dominante Fließrichtung des Grundwassers im Bereich der Talfüllung in Kilchberg ist nordwärts gerichtet (Abbildung 5). Kleinert (1976) hat durch Pumpversuche für die Region Kilchberg eine mittlere hydraulische Durchlässigkeit von  $k_f = 0,00064 \text{ m s}^{-1}$  bestimmt, welcher in den folgenden Berechnungen auch verwendet wird.

Nach Hähnlein (2008) liegt der mittlere effektive Porenraum für einen mittleren sandigen Kies bei ca. 33 %. Kleinert (1976) bestimmte hier durch Tracerversuche über die Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  einen mittleren effektiven Porenraum von ungefähr 23 %, welcher allerdings für den Wärmetransport irrelevant ist. Hierfür wird der Gesamtporenraum benötigt, der zwangsläufig größer als der effektive ist (Carslaw und Jaeger, 1959).



**Abbildung 5: Grundwassergleichenplan des LGRB für den Neckarabschnitt zwischen Rottenburg a.N. und Tübingen. Der rote Kreis zeigt das Untersuchungsgebiet.**

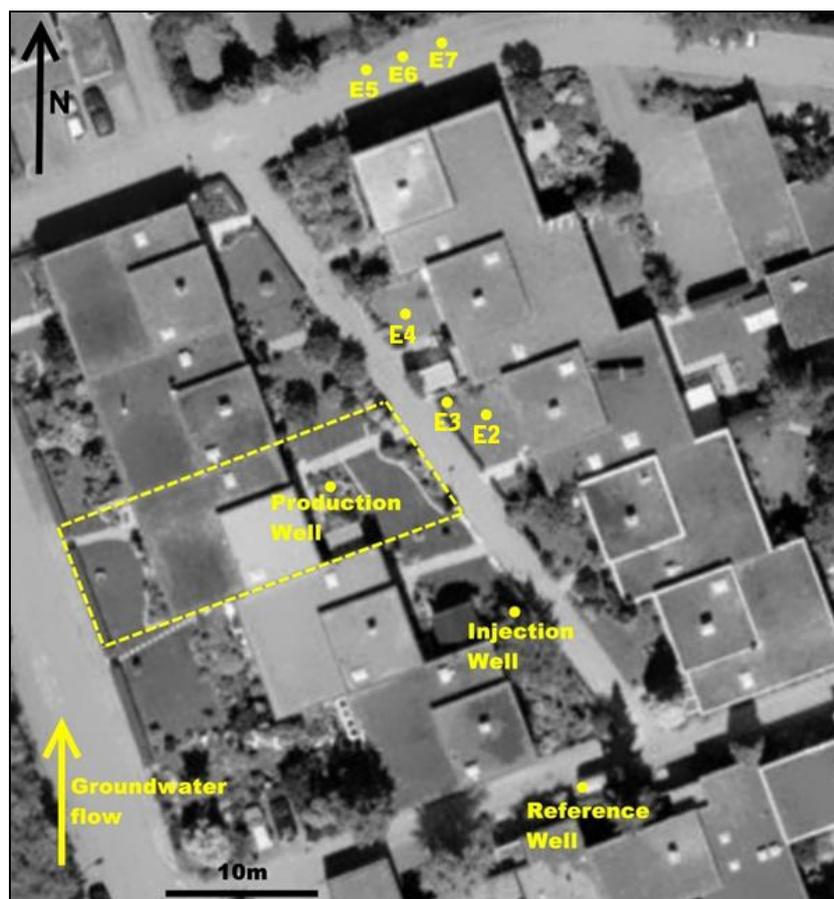
Die Messpegel wurden mithilfe eines Direct Push Geräts der Firma GeoProbe (Modell 6610DT) gebohrt. Dieses Bohrgerät hat den Vorteil, dass das Bohrgestänge vorzugsweise gedrückt wird und somit bindige und rollige Böden fast ungestört beprobt werden können. Bei größeren Widerständen, wie in den vorliegenden Kiesen sein kann, wird manuell die Hammerfunktion zugeschaltet werden. Dadurch können verhältnismäßig ungestörte Proben des Untergrundes entnommen werden. Diese Probenahme erfolgte mit sogenannten Linern. Liner sind PVC-Rohre, die mit einem Führungsrohr in das Bohrgestänge eingebaut und mit diesem in den Boden gedrückt werden. Das Führungsrohr wird über ein dünneres Gestänge am Schlagkopf des Bohrgestänges fixiert. Die PVC-Rohre sind am Ende mit sternförmig angeordneten, nach innen gewölbten PVC-Laschen versehen, die ein Herausrutschen der Bodenprobe verhindern.

Der Vorteil dieser Art des Messpegelbaus bzw. der Bodenprobenahme gegenüber üblicher Kleinrammbohrungen mit Handgeräten wie Bosch-, Cobra- oder Wacker-Hammer liegt darin, dass hier das Bohrgestänge im Boden verweilen kann, ein Zusammenfallen des Bohrlochs ausgeschlossen wird und der Einbau der Pegelverrohrung im Bohrgestänge geschehen kann.

Nachdem die Pegelverrohrung bis zur Endteufe eingebracht ist, muss sie mit Wasser aufgefüllt werden, um beim Ziehen des Bohrgestänges ein Auftreiben der leichten HDPE-

Rohre durch das von unten herein strömende Grundwasser zu verhindern. Die sechs Beobachtungspegel sowie der Referenzpegel oberstromig wurden zwischen 8,3 m und 9,4 m abgeteuft und mit 1"-HDPE-Filterrohren (geliefert durch MPBF, Haigerloch) bis ca. einen Meter über Grundwasserstand sowie mit HDPE-Vollrohren (geliefert durch MPBF, Haigerloch) ausgebaut. Der Ringraum wurde mit 2 mm Quarzsand (nach DIN 4924) bis zu einer Tiefe von drei Metern verfüllt. Der restliche Raum wurde mit Bentonit-Pellets (geliefert durch Bohrtechnik Goller, Kirchentellinsfurt) verfüllt und gewässert, um eine DIN-konforme (DIN 18302 und 18336) Abdichtung des Aquifers gegenüber der Oberfläche zu gewährleisten. Alle Messstellen wurden mit gusseisernen Unterflurdeckeln nach DIN 4055 abgeschlossen, um einen tagwasserdichten Stauraum für die geplante Langzeitmesstechnik der Universität Stuttgart zu gewährleisten. Der schematische Ausbauplan ist in Anlage 1 dargestellt.

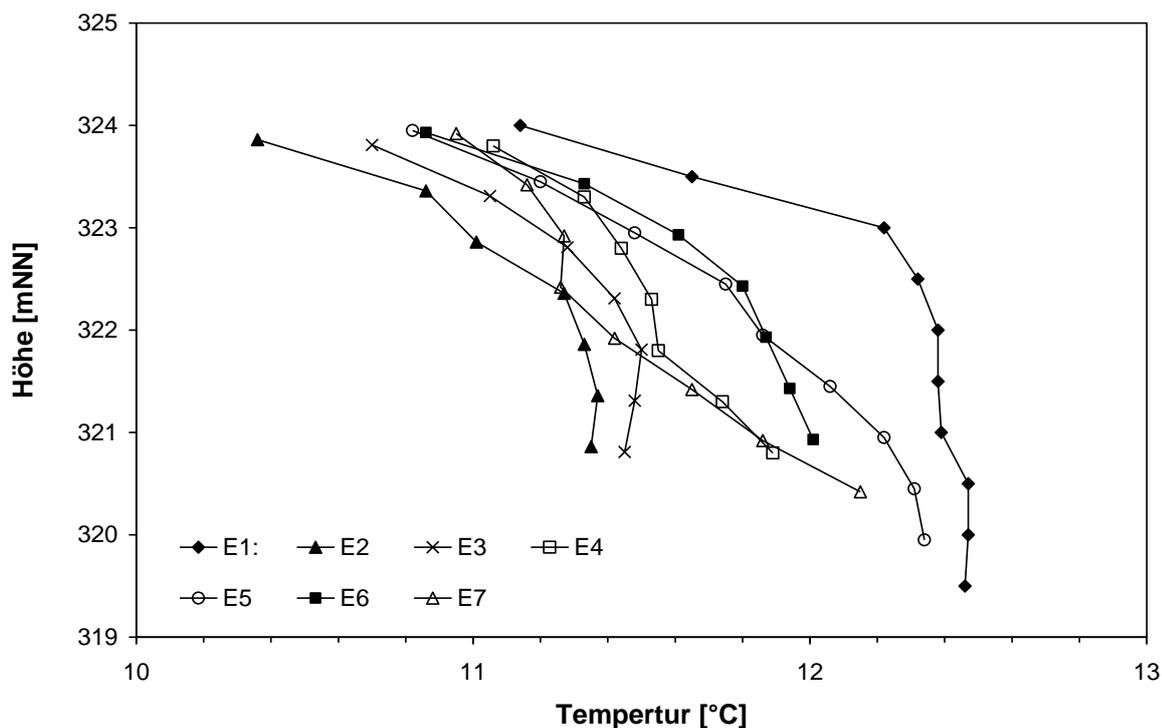
Bei der Auslegung des Testfeldes, insbesondere der Positionierung der Messstellen, musste ein Kompromiss aus den Anforderungen einer optimalen räumlichen Abdeckung des zu beobachteten Grundwasserleiters und der bereits vorhandenen Bebauung (z.B. Gebäude, Kanalisation, Leitungen, usw.) gefunden werden. Diese Einschränkungen erlauben daher derzeit keine zielführende Erweiterung des Testfeldes.



**Abbildung 6:** Testfeld für eine Grundwasserwärmepumpenanlage in Kilchberg bei Tübingen (Wallisch, 2010).

Für Voruntersuchungen wurden einzelne Stichtagsmessungen vorgenommen (Abbildung 7). Die Grundwassertemperatur wurde mit einem Lichtlot und in einem vertikalen Abstand von 0,5 m gemessen. Die Messdaten in der Referenzmessstelle (E1) oberstromig zeigen

in den ersten ein bis eineinhalb Metern der Grundwassersäule den Abkühlungstrend der Oberfläche (Abbildung 7). In fast allen Pegeln ist generell ein Abkühlungstrend bezogen auf die Referenzmessstelle (E1) von bis zu 1,1 K (Pegel E2) zu erkennen. Diese Abkühlung hängt mit dem Oberflächeneinfluss und dem Betrieb der GWWP zusammen. Aufgrund von diversen Schwierigkeiten, wie zum Beispiel Kälte oder Vandalismus (Bisch und Klaas, 2012), konnte der Kooperationspartner der Universität Stuttgart bis heute kein permanentes Temperaturmonitoring installieren.



**Abbildung 7: Vertikale Grundwassertemperaturprofile in den Pegeln E1 (Referenzmessstelle) bis E7 gemessen am 8. März 2010 im Testfeld Kilchberg.**

### 3.1.2 Analytische Modelle

Die Temperatursausbreitung, die von geothermischen Systemen verursacht wird, kann unter Berücksichtigung bestimmter Annahmen durch spezielle analytische Lösungen beschrieben werden. Für die Berechnung der Ausdehnung der Temperaturfahne für offene geothermische Anlagen werden drei analytische Lösungen betrachtet, die von Rauch (1992), die von Ingerle (1988) und die aus dem aktuellen Leitfadens Baden-Württembergs über die Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen (Umweltministerium, 2009).

#### 3.1.2.1 Ansatz Rauch (1992)

Grundsätzlich geht Rauch (1992) vom Fick'schen Gesetz der molekularen Diffusion aus, um eine Näherungslösung für den Wärmetransport aus dem etablierten Stofftransport abzuleiten. In seinem empirischen Ansatz wird auf die Änderungen der Fließrichtung des Grundwassers durch saisonale Schwankung (Verschwenkungswinkel  $\beta$ ) verstärkt eingegangen. Dazu kombiniert er  $\beta$  mit der Dispersion (Grundwasserschwankungswinkel), welche sich aus dem Dispersionstensor, aus dem die physikalische Vermischung quer zur

Fließrichtung bestimmt werden kann, ergibt (Kinzelbach, 1987). Die thermisch retardierte Geschwindigkeit  $v_t$  wird nach Rauch (1992) wie folgt definiert:

$$v_t = v_f \frac{c_w}{c_{pm}} \quad (1)$$

Hierbei wird die Fließgeschwindigkeit  $v_f$  mit dem Quotienten aus der spezifischen Wärmekapazität des Wassers  $c_w$  und des Grundwasserleiters  $c_{pm}$  multipliziert. Für konservative Stofftransportvorgänge kann man über das komplementäre Gauß'sche Fehlerintegral eine Standardabweichung für die Vermischungszone bzw. die Temperaturverteilung bestimmen, welches für den vergleichbaren Wärmetransport ebenfalls angewendet werden kann:

$$\sigma_T = \sqrt{2 \left( \alpha_t + \frac{\lambda_m}{c_w v_f} \right)} \times \sqrt{x} \quad (2)$$

Hier steht  $\sigma_T$  für die Standardabweichung, welche in Abhängigkeit von der transversalen Dispersivität  $\alpha_t$ , der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_m$ , der Fließgeschwindigkeit  $v_f$ ,  $c_w$  und der des Abstandes  $x$  steht. Diese Abweichung hat Rauch (1992) empirisch untersucht und festgestellt, dass die Standardabweichung Werte zwischen 0,5 und 1,8 annehmen kann. Eine mögliche Vereinfachung ist daher  $\sigma_T = x^{0,5}$ . Für diese Näherungslösung sind folgende Voraussetzungen zu beachten: Sie ist nur unter stationären Bedingungen beziehungsweise kontinuierlicher Verschwenkung der Grundwasserfließrichtung gültig. Eine Adaption an instationäre Bedingungen kann über das Jahresmittel der Pumpleistung erfüllt werden. Sie beachtet weder Oberflächeneinfluß noch den geothermischen Gradienten im Ergebnis. Die berechnete Temperaturverteilung stellt nur den Mittelwert über die Grundwassersäule dar. Somit sind Abweichungen der Felddaten über die wassererfüllte Mächtigkeit des Aquifers obsolet. Die Injektion wird als Linienquelle in Parallelströmung angenommen. Ist die Ausbreitung konvektiv dominiert, ist diese Näherungslösung jedoch nicht gültig.

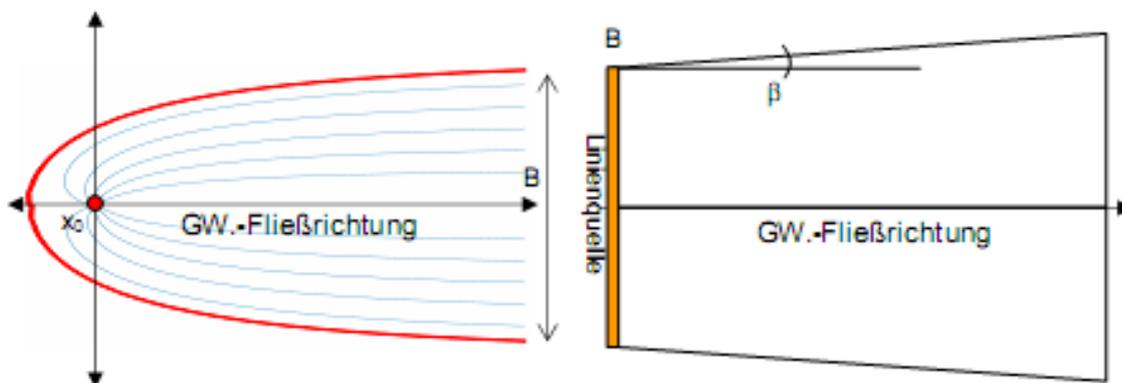


Abbildung 8: Analytisches Strömungsbild - hydraulische Näherung (Sitzenfrei, 2007).

Rauch (1992) behandelt den Schluckbrunnen als horizontale Linienquelle (Abbildung 8). Die Breite der Linienquelle  $B$  wird mit Hilfe der Formel für die Entnahmebreite eines Brunnens beschrieben:

$$B = \frac{Q}{H v_f} \quad (3)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die Förder- bzw. Injektionsrate  $Q$  für den instationären Fall über die jährlichen Betriebsstunden der Wärmepumpe gemittelt werden muss, um gültige Ergebnisse zu erzielen.  $H$  entspricht der Mächtigkeit der gesättigten Zone im Grundwasserleiter. Für die Breite der horizontalen Vermischungszone  $B_V$  gilt

$$B_V = x \times \tan(\beta) + \frac{\sigma_T}{\cos(\beta)} \quad (4)$$

Hiermit lässt sich nun die Länge der partiellen Mischungszone  $L_{PM}$  bestimmen:

$$B_V = L_{PM} \times \tan(\beta) + \frac{\sqrt{L_{PM}}}{\cos(\beta)} \times \sqrt{2 \left( \alpha_t + \frac{\lambda_m}{c_w v_f} \right)} \quad (5)$$

Im Bereich der partiellen Mischungszone bleibt die eingeleitete Temperatur erhalten, da sich die transversalen Vermischungsvorgänge nicht bis zur Mitte der Temperaturfahne auswirken. Erst ab dem Mischpunkt  $M$  ist eine komplette Durchmischung von den Rändern anzunehmen und somit ein Abkühlung der Temperaturanomalie (Abbildung 9). Damit folgt für die Gesamtbreite der Temperaturanomalie quer zur Fließrichtung  $B_A$ :

$$B_A = B + 2B_V \quad (6)$$

Für den Bereich der totalen Vermischung ( $x > L_{PM}$ ) gilt somit  $B_A \times T(x) = B \times T_i + 2B_V \times T_u$  und umgeformt nach Rauch (1992)

$$T(x) = \frac{B \times T_i + 2 \times (x \times \tan(\beta) + \sqrt{x}) \times T_u}{B + 2 \times (x \times \tan(\beta) + \sqrt{x})} \quad (7)$$

wobei  $T_i$  der eingeleiteten Temperatur, also dem Rücklauf der Grundwasserwärmepumpe und  $T_u$  der ungestörten Hintergrundtemperatur des Grundwassers entspricht. Diese vereinfachte Darstellung ermöglicht es in der Anwendung, nur  $\beta$  als Parameter einzusetzen, der nicht quantifizierbar ist. Allerdings bietet Rauch (1992) hierfür Anhaltswerte zwischen  $5^\circ$  (keine Verschwenkung, geringe Dispersion) und  $15^\circ$  (große Verschwenkung, starke Dispersion). Alle weiteren Parameter sind für eine rechtliche Regulierung in Österreich maßgebend und müssen somit bekannt sein.

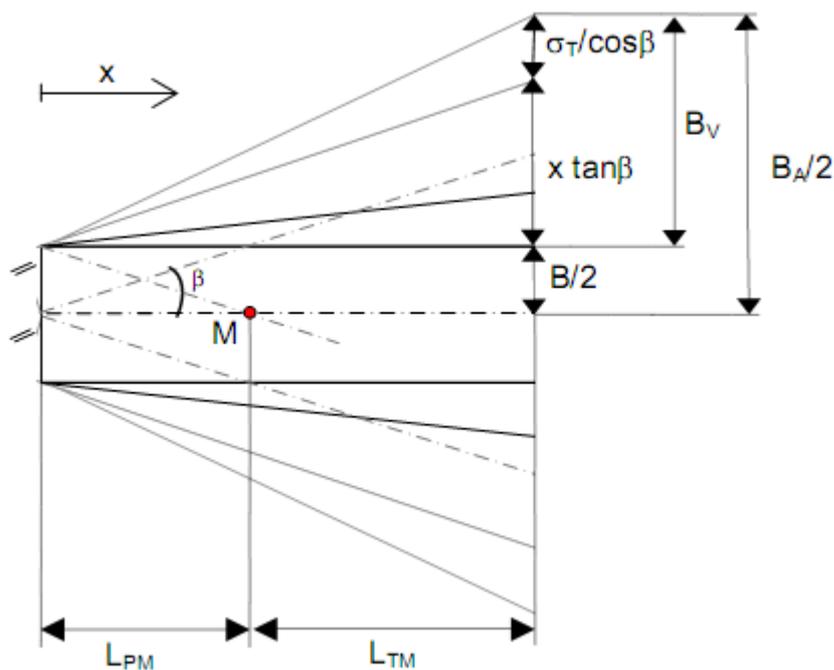


Abbildung 9: Darstellung der partiellen Mischungszone im Abstrombereich  $L_{PM}$  (Sitzenfrei, 2007).

### 3.1.2.2 Ansatz Ingerle (1988)

Der Ansatz nach Ingerle (1988) betrachtet nicht nur die horizontale Ausbreitung der Temperaturfahne, sondern berücksichtigt auch den vertikalen Wärmeeintrag von der Oberfläche. Dabei wird als Näherung angenommen, dass der vertikale Energiefluss sich bis in die Mitte des Grundwasserleiters erstreckt. Somit ergibt sich folgende proportionale Energieaufnahme des Grundwassers  $E_A$  von der Oberfläche:

$$E_A = \varepsilon \times F \times \Delta T \quad (8)$$

Wobei  $\varepsilon$  sich wie folgt berechnet:

$$\varepsilon = \frac{\lambda_{m\_D}}{D + \frac{H \times \lambda_{m\_D}}{2 \times \lambda_{m\_Aq}}} \quad (9)$$

mit  $A$  als Mächtigkeit der Deckschicht,  $\lambda_{m\_D}$  als deren Wärmeleitfähigkeit und  $\lambda_{m\_Aq}$  als Wärmeleitfähigkeit des Grundwassers erfüllten Aquifers mit der Mächtigkeit  $H$ . Diese Berechnung gilt hier ebenfalls nur unter der Annahme, dass der Grundwasserspiegel und der Flurabstand konstant sind und der Grundwasserleiter homogen ist. Dies ist nötig, da der geothermische Gradient vernachlässigt wird und nur der Wärmeeintrag der Oberfläche und die horizontale Vermischung im Grundwasserleiter berechnet werden. Zudem ist für die spätere Berechnung die Einleitung des thermisch genutzten Wassers in einen vollkommenen Brunnen Voraussetzung. Der Wärmeeintrag der Oberfläche lässt sich nach Ingerle (1988) wie folgt berechnen:

$$\varepsilon \times B \times x = 1000 \times Q \times \ln \left( \frac{T_0 - T_i}{T_0 - T} \right) \quad (10)$$



Zur Verbesserung der Ergebnisse nach Ingerle (1988) wurde dieser analytische Ansatz mithilfe des Ansatzes von Rauch (1992) modifiziert und beschreibt die Ausbreitung der Temperaturanomalie nach folgender Gleichung:

$$T_{i+1} = \frac{T_i + \frac{2 \cdot \Delta x \cdot \tan(\beta)}{B_i} \cdot T_u + \frac{\Delta x \cdot \varepsilon \cdot \left(1 + 0,5 \cdot \frac{2 \cdot \Delta x \cdot \tan(\beta)}{B_i}\right)}{2000 \cdot q} \cdot (2 \cdot T_0 - T_i)}{1 + \frac{2 \cdot \Delta x \cdot \tan(\beta)}{B_i} + \frac{\Delta x \cdot \varepsilon \cdot \left(1 + 0,5 \cdot \frac{2 \cdot \Delta x \cdot \tan(\beta)}{B_i}\right)}{2000 \cdot q}} \quad (14)$$

### 3.1.2.3 Ansatz Leitfaden (2009)

Im Oktober 2009 wurde vom Umweltministerium Baden-Württemberg der Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen (GWWP) veröffentlicht. Dieser beinhaltet eine analytische Lösung zur Berechnung von Temperaturfahnen, entwickelt von der Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH im Auftrag des Landes Baden-Württemberg, die im Folgenden dargestellt wird. Im Wesentlichen beruht die Herleitung der analytischen Lösung auf der Stofftransportgleichung nach Kinzelbach (1987) (LUBW, 2009). Hierbei wurden lediglich die Parameter des Stofftransportes auf die des Wärmetransports adaptiert.

Kobus und Partner geben als Grenzbedingungen eine minimale Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  von einem Meter pro Tag, eine maximale thermische Nutzung von  $45.000 \text{ kWh a}^{-1}$  und eine maximale Brunnenabstrombreite von 30 Meter an. Da diese analytische Lösung nicht die Veränderung der Fließeigenschaften im Bereich der Brunnenabstrombreite (Gleichung 3) berücksichtigt, sind die Ergebnisse in diesem Radius nicht verwendbar (LUBW, 2009). Zudem muss es sich beim Injektions- bzw. Schluckbrunnen um einen vollkommenen Brunnen handeln, also ein Brunnen, der über die gesamte Tiefe des Aquifers abgeteuft ist. Ist dies nicht der Fall, muss die Tiefe einer 3D-Trennstromlinie als Begrenzung berechnet werden. Es ist weiter zu beachten, dass generell die über das Jahr gemittelte Förderrate  $Q$  zu verwenden ist. Für den instationären Fall im Winterbetrieb soll diese Förderrate verdoppelt werden, um die verstärkte Nutzung während der Heizperiode zu berücksichtigen. Die Förderrate  $Q$  wird, sofern keine Daten vorhanden sind, nach dem Leitfaden über die Energiebilanz  $S = N - E$ , wobei  $S$  dem Energieentzug aus dem Grundwasser,  $N$  der gewünschten Nutzenergie und  $E$  der zugeführten elektrischen Energie entspricht, wie folgt berechnet:

$$Q = \frac{S}{c_{pw} \times \Delta T_E} \quad (14)$$

Hier ist  $\Delta T_E$  die Temperaturdifferenz zwischen Hintergrundtemperatur des Grundwassers und der Temperatur des eingeleiteten bzw. rückgeführten Grundwassers, sowie  $c_{pw}$  seine volumetrische Wärmekapazität.

Sind die vorangegangenen Bedingungen erfüllt, ist die folgende Näherungslösung anwendbar. (LUBW, 2009)

$$\Delta T(x, y, t) = \frac{Q\Delta T_E}{4n_e m v_a \sqrt{\pi\alpha_T}} \cdot \exp\left(\frac{x-r}{2\alpha_L}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r-v_a t/R}{2\sqrt{v_a\alpha_L t/R}}\right) \quad (15)$$

$$\text{mit: } r = \sqrt{x^2 + y^2} \frac{\alpha_L}{\alpha_T}$$

wobei  $m$  der Mächtigkeit der gesättigten Zone im Grundwasserleiter,  $v_a$  der Abstandsgeschwindigkeit,  $\alpha_l$  der longitudinalen Dispersivität,  $t$  der Laufzeit und  $R$  der thermischen Retardation entsprechen. Der Parameter  $r$  ist auch hier mit dem mittleren Verschiebungsquadrat, bekannt aus dem Stofftransport, vergleichbar und gibt den korrigierten Ortsvektor der Temperaturverteilung wieder. Der erste Term von Gleichung (14) betrachtet den Einfluss der eingeleiteten Temperaturveränderung in den Aquifer, zweiter und dritter Term betrachten die Ausbreitung quer zur Fließrichtung, die komplementäre Fehlerfunktion betrachtet den Transport in Fließrichtung des Grundwassers. Die Betrachtung vertikaler Wärmeeinflüsse entfällt.

### 3.1.3 Numerisches Modell

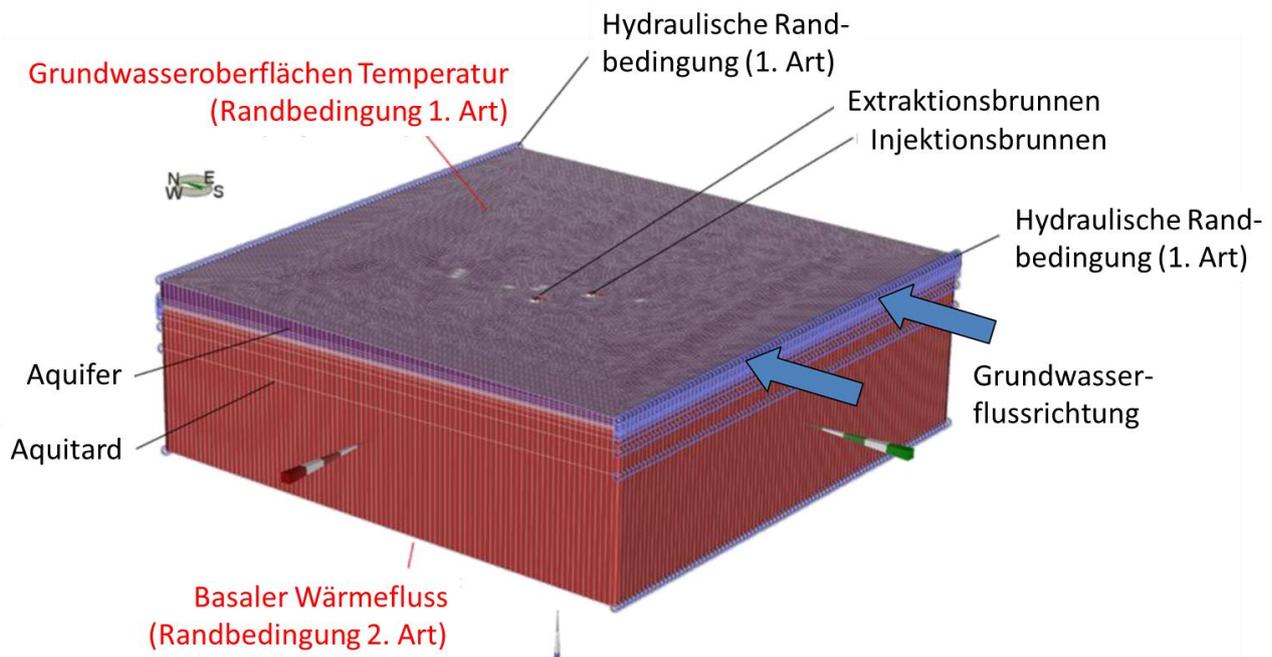
Die bisher vorgestellten analytischen Modelle beinhalten immer eine vereinfachte und idealisierte Vorstellung des jeweiligen Untergrundes. Eine Möglichkeit für die Entwicklung komplexerer Modelle stellt eine numerische Simulation dar. Für diese Studie wurde ein numerisches Modell entwickelt, um das Prozessverständnis des Wärmetransportes in Zusammenhang mit offenen geothermischen Systemen zu verbessern. Ein besonderer Fokus soll hier auf die möglichen Einflüsse der Aquiferränder gelegt werden. Für das numerische Modell von Cless (2012) wurde das Finite Element Programm FEFLOW verwendet. Das numerische Modell umfasst ein Gebiet von 200 m × 200 m × 65.5 m (Länge × Breite × Tiefe) (Anlage 2). Das Finite Element Netz besteht insgesamt aus 226845 prismatischen Elementen die sich gleichmäßig auf 14 Schichten verteilen. Die horizontale Diskretisierung besitzt sowohl an den beiden Brunnen als auch an den jeweiligen Temperaturmessstellen eine erhöhte Auflösung. In vertikaler Richtung wurde die Diskretisierungsauflösung am Übergang von Aquifer zu Aquitard erhöht.

Die hydraulischen Randbedingungen des Aquifers wurden aus der Arbeit von Schollenberger (1998) hergeleitet. Die thermischen Randbedingungen wurden im Rahmen der Diplomarbeit von Wallisch (2010) bestimmt. Die verwendeten hydraulischen und thermischen Randbedingungen sind in Tabelle 1 aufgelistet und in Abbildung 11 dargestellt.

**Tabelle 1: Hydraulische und Thermische Randbedingungen des FEFLOW Modells.**

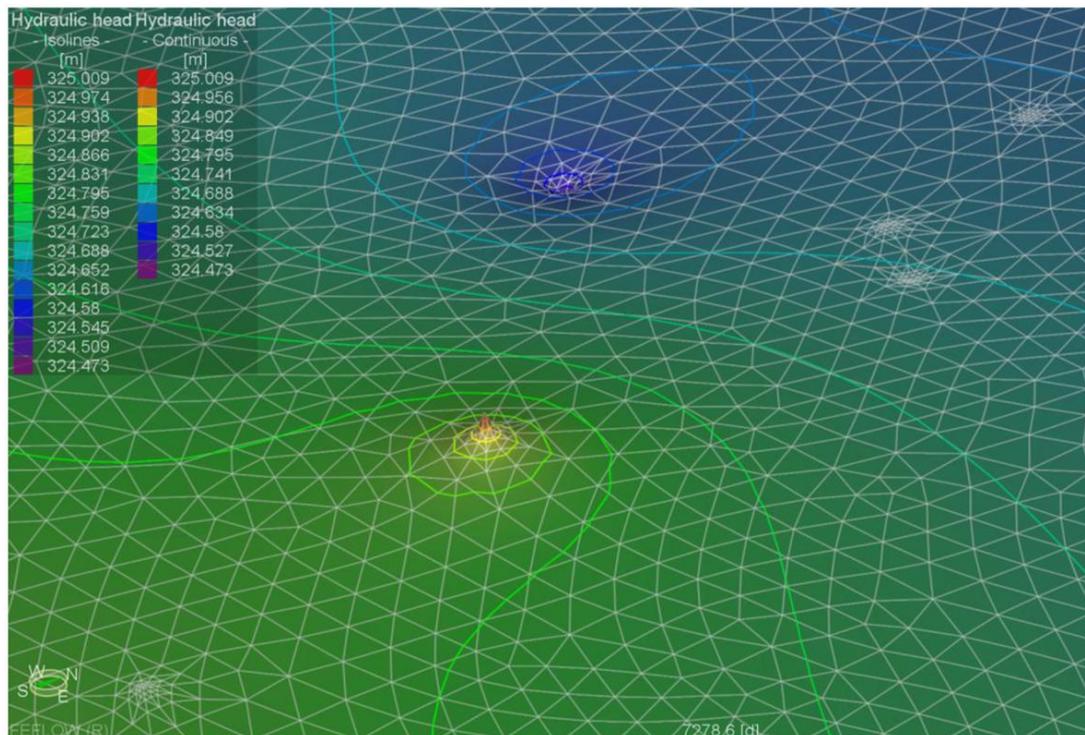
Hydraulische Randbedingung:	Festpotential an südlichem (324,0 m) und nördlichem Rand (325,0 m) des Modells. 1.Art Zeitlich variable Injektion bzw. Extraktion des Systems. (4. Art)*
Thermische Randbedingung:	Basaler Wärmefluss 50 – 80 mW / m. (2.Art) Definierte Oberflächentemperatur. (1. Art) Zeitlich variable Temperatur des Injektions- bzw. Extraktionswassers. (1. Art)*

\*Kopplung beider Randbedingungen vorgenommen, um die speziellen Erfordernisse des Systems abbilden zu können.



**Abbildung 11: Überblick des entwickelten FEFLOW Modells und den verwendeten hydraulischen und thermischen Randbedingungen (nach Cless, 2012).**

Cless (2012) verwendete den „moving mesh“ Ansatz um die ungespannten Verhältnisse des Kilchberger Aquifers berücksichtigen zu können. Hierbei kann das System als hydraulisch gespannt berechnet werden, da die Position der Grundwasseroberflächenknoten dynamisch an die Lage des Grundwasserspiegels angepasst werden. Die Höhenänderung der obersten Finite-Element-Schicht unter Berücksichtigung der „moving mesh“-Effekte ist in Abbildung 12 dargestellt.



**Abbildung 12: Phreatisches Finite-Element-Netz.**

Cless (2012) hat zwei unterschiedliche Varianten der Injektionsbrunnensimulation implementiert. Die erste Variante stellt den Injektionsbrunnen als rein thermische Randbedingung dar, die Energie mit einer definierten Rate in den Untergrund einbringt. Diese Variante berücksichtigt aber nicht die hydraulische Interaktion zwischen dem Brunnen und dem Aquifer. Die zweite Variante berücksichtigt dagegen die besonderen thermodynamischen Bedingungen des Grundwasserwärmepumpensystems, indem der Injektionsbrunnen mit dem FEFLOW plug-in OpenLoop simuliert wird. Hierbei werden die beiden Brunnen numerisch miteinander gekoppelt, so dass die Menge an Wasser, die aus dem Extraktionsbrunnen entnommen wird, über den Injektionsbrunnen dem Aquifer wieder zu geführt wird. Zusätzlich wird die Temperatur des Wassers dem Aquifer zurückgeführt wird durch einen bestimmten Temperaturbetrag abgekühlt oder erhitzt (Abbildung 13). In diesem numerischen Modell werden die beiden Brunnen der geothermischen Anlage wie folgt dargestellt. Es werden nur die hydraulisch aktiven Filterstrecken der beiden Brunnen berücksichtigt. Hierbei wird die Filterstrecke durch ein „Diskretes Feature Element“ (DFE) dargestellt. Ein DFE ist ein Element niedriger Dimension, das verschiedene Knoten des eigentlich höherdimensionalen numerischen Netzes mit einander verbindet. DFE eignen sich sehr gut zur Simulation von Spalten und Hohlräumen oder von Brunneninstallationen. Durch die Verwendung von DFEs kann sichergestellt werden, dass das injizierte Wasser gemäß der hydraulischen Eigenschaften des Aquifers über die gesamte Filterstrecke in den Aquifer eingeleitet wird.

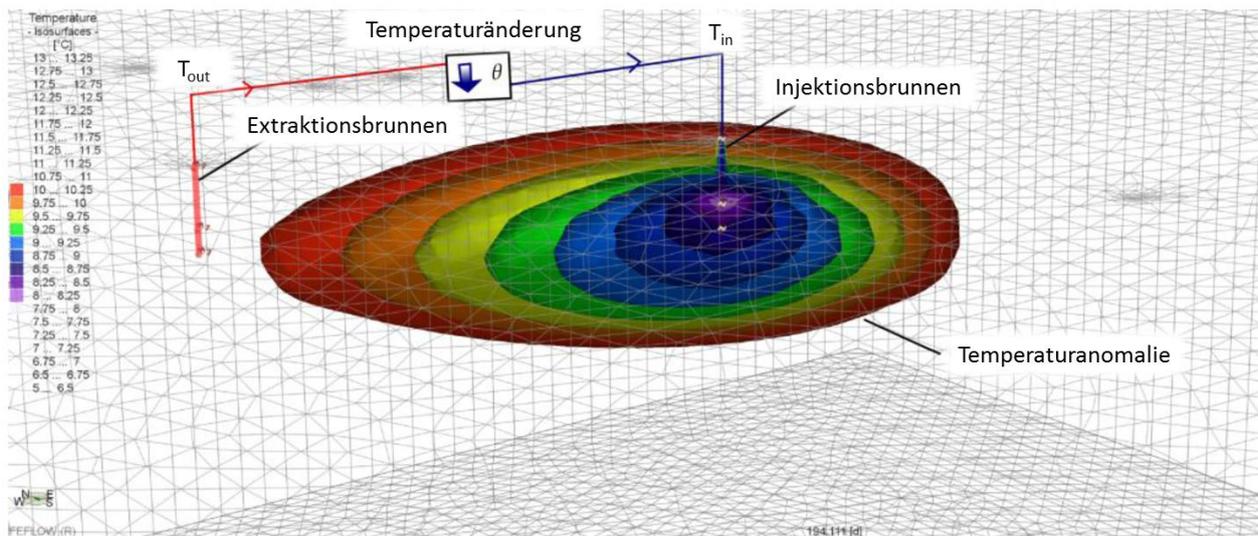


Abbildung 13: Simulation eines Injektions und Extraktionsbrunnenpaares.

### 3.1.4 Berechnung

#### 3.1.4.1 Analytische Berechnungen

Die analytischen Modelle wurden nur mit den Ergebnissen der Stichtagsmessungen verglichen (Abbildung 7). Hierbei hat sich gezeigt, dass der Abkühlungstrend schneller und ausgeprägter sichtbar ist als durch das Modell prognostiziert wird. Dies liegt darin begründet, dass die Pegelrohre nicht mit Boden gefüllt sind, welcher den Temperaturverlauf zeitlich dämpfen würde. Somit sind diese Werte für die Betrachtung der Abkühlung durch eine Grundwasserwärmepumpe (GWWP) auszuschließen. Dennoch geben die relativen Temperaturunterschiede zwischen den Pegeln Aufschluss über den Einfluss der GWWP an verschiedenen Stellen im Untersuchungsgebiet und deren Größenordnung wieder. Betrachtet man nun die drei verschiedenen analytischen Modelle im Detail und vergleicht diese, ergeben sich trotz identischer Eingabeparameter unterschiedliche Ergebnisse (Abbildung 14). So liegt die 1 K Grenze der Näherung nach Rauch (1992) bei ca. 20 m, nach Ingerle (1988) bei ca. 40 m und nach dem Berechnungsprogramm des Leitfadens (Umweltministerium, 2009) sogar bei ca. 80 m im Abstrom der GWWP. In den räumlich zum Injektionsbrunnen nächsten Messstellen E1 wurden Temperaturveränderungen unabhängig vom Oberflächeneinfluss gemessen, die um bis zu 1,1 K von der Referenztemperatur (12,5°C) abweichen. Somit liegen diese Messstellen im Bereich der Temperaturanomalie.

Die während der Temperaturmessung gewonnenen Grundwasserhöhen zeigen eine N-NE Grundwasserfließrichtung anstatt der aus vorherigen Studien (z.B. Grundwassergleichplan des LGRB) abgeleitete nordwärts gerichtete Grundwasserfließrichtung. Da die Anordnung der Messpegel damit nicht den gesamten Bereich der Temperaturfahne abdeckt, lässt sich die Geometrie der Temperaturfahne nur bedingt beurteilen und lässt daher keine eindeutige Validierung der analytischen Modelle zu.

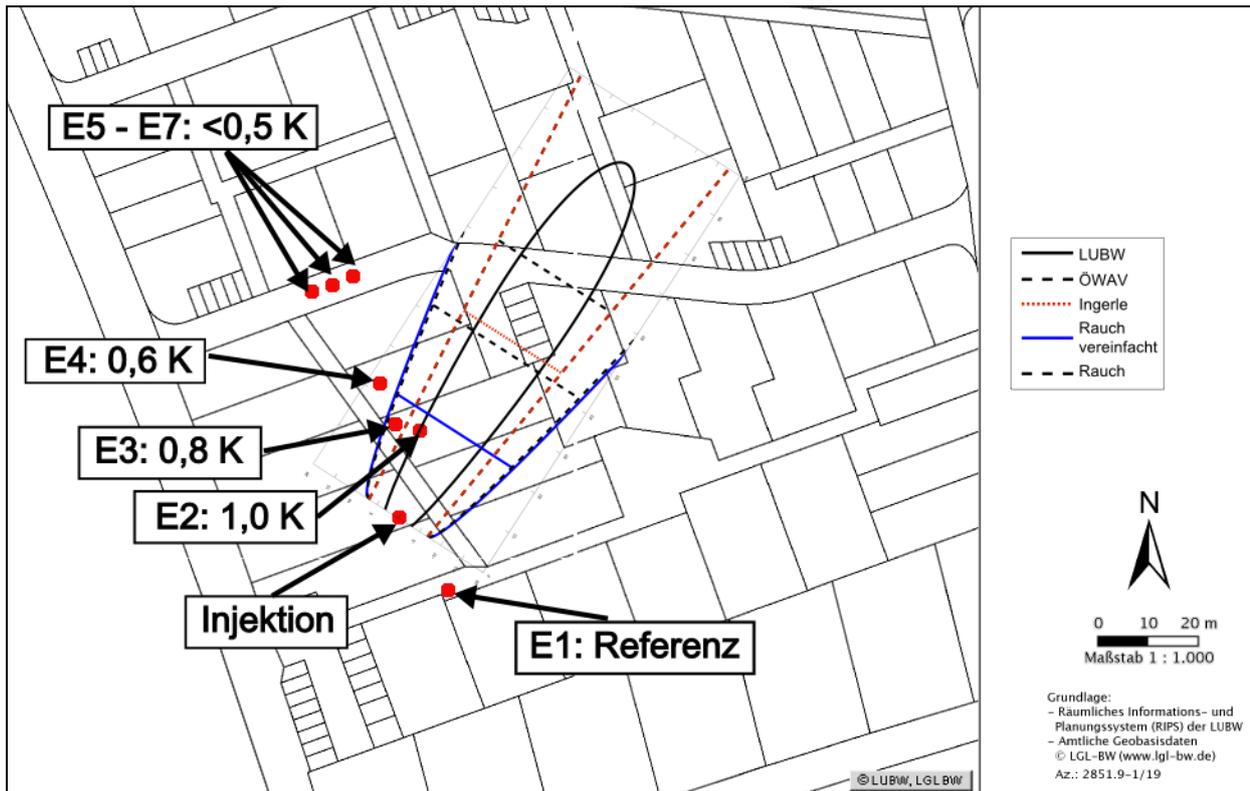


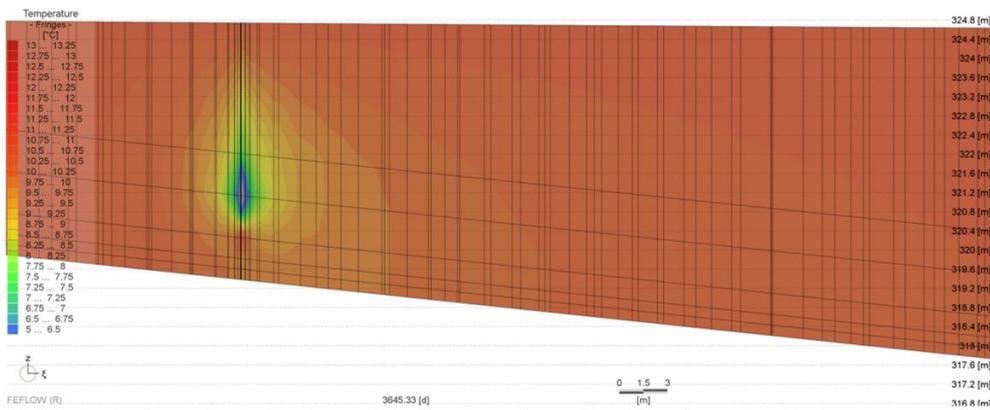
Abbildung 14: Vergleich der Näherungslösungen mit dem Ergebnis der 1 K-Kennlinie in gemessener Grundwasserfließrichtung mit den maximalen Temperaturunterschieden zur Referenzmessstelle E1 (Berner, 2011).

### 3.1.4.2 Numerische Berechnungen

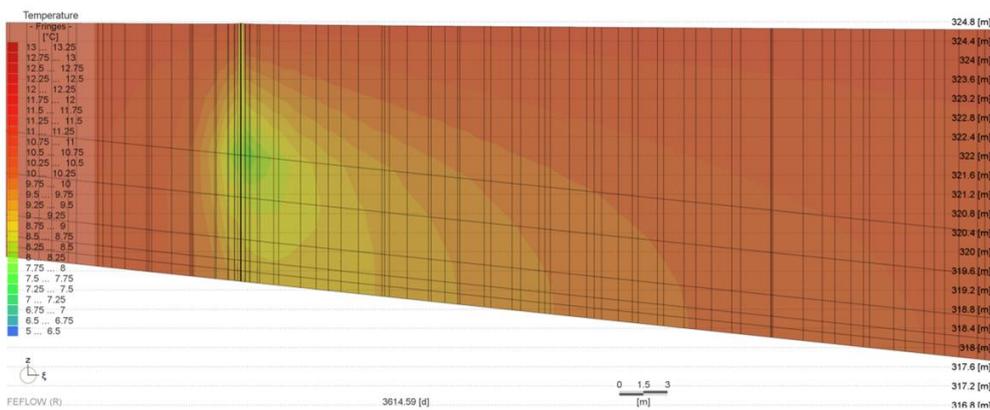
Basierend auf dem Fehlen von durchgehenden Temperaturmesswerten, wurde das entwickelte numerische Modell zur Analyse von Randbedingungeffekte angewandt. Cless (2012) analysierte unter anderem die Effekte des Aquitards auf den geothermisch genutzten Aquifer und die Darstellung des Energieeintrages über den Brunnen in den Aquifer.

Der Vergleich der verschiedenen Darstellung des Energieeintrages in den Aquifer zeigt eine deutlich unterschiedliche Temperatureausbreitung im Grundwasser zwischen den beiden untersuchten Varianten (Abbildung 15).

a)



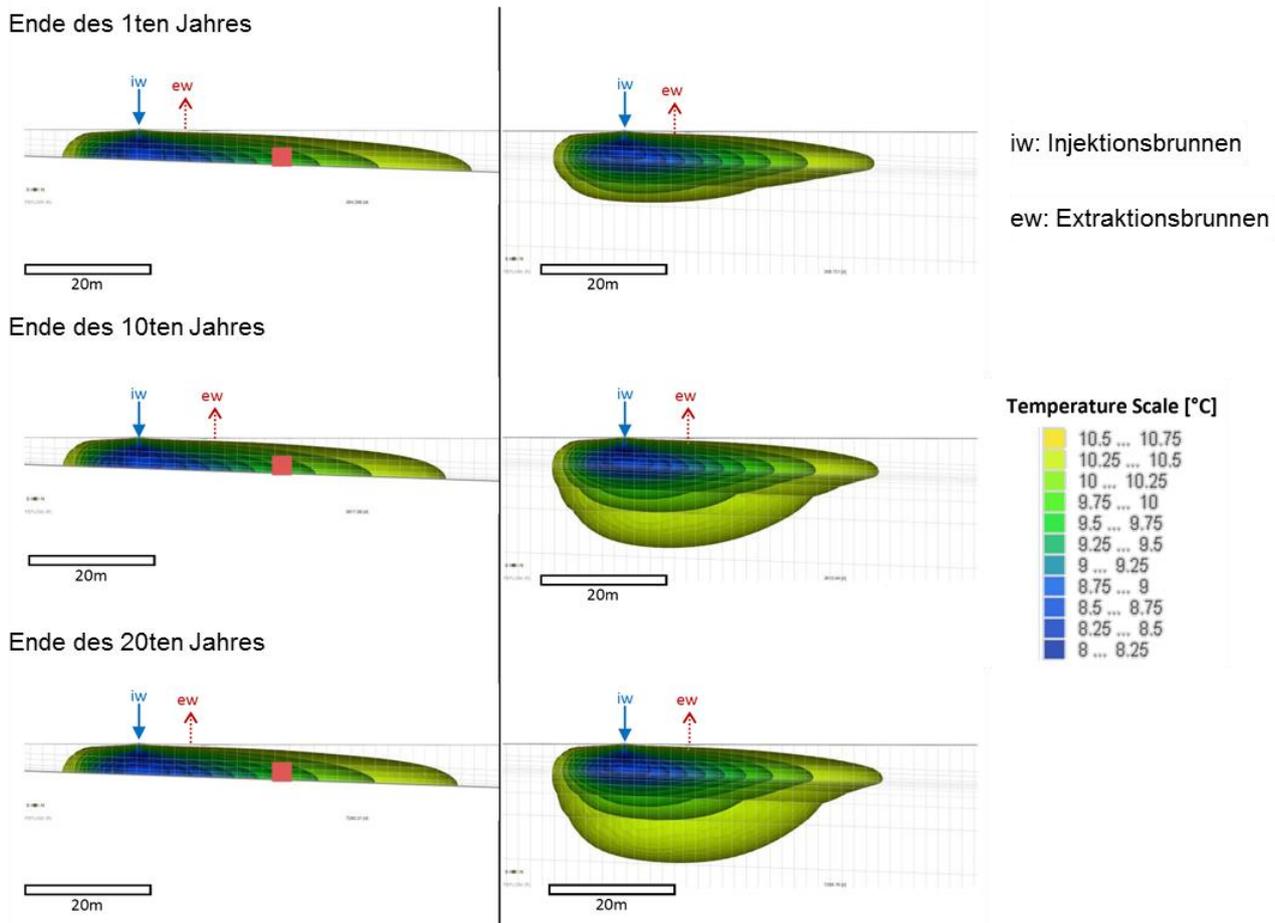
b)



**Abbildung 15: Vergleich von zwei verschiedenen Simulationsansätzen des Injektionsbrunnens. a) nur thermische Randbedingung; b) hydraulische und thermische Randbedingungen.**

Die rein thermische Simulation des Energieeintrages resultiert in einer deutlich fokussierten Temperaturanomalie (Abbildung 15a). Dagegen bildet sich bei der zweiten Variante, die sowohl den thermischen als auch den hydraulischen Aspekt eines offenen geothermischen Systems berücksichtigt, eine deutlich längere Temperaturanomalie aus (Abbildung 15b). Die Temperaturanomalie ist um einen Faktor 3 länger. Wobei sich die minimalsten berechneten Temperaturwerte bei der ersten Variante ergeben.

Die Auswirkungen der Berücksichtigung oder Vernachlässigung des Aquifers werden in Abbildung 16 präsentiert. Hierbei werden die resultierenden Temperaturfahnen von zwei unterschiedlichen Simulationen miteinander verglichen. Der Aquitard besitzt eine Wärmeleitfähigkeit von  $2,8 \text{ W (m K)}^{-1}$ . Cless (2012) zeigt, dass sich ein offenes geothermisches System nicht nur auf die Temperatur des Aquifers, sondern auch auf die Temperatur des unterliegenden Aquitards auswirkt. Das „Aquitard“-Modell zeigt, dass sich die Kälte schnell im Aquitard ausbreitet und dort gespeichert werden. Daher wird sich unterhalb des Injektionsbrunnens ein Reservoir an kaltem Wasser ansammeln. Diese kalte Temperatur-anomalie kann sich über Jahre hin aufbauen, da sie sich nicht komplett während der Regenerationsphase im Sommer zurückbildet.



**Abbildung 16: Entwicklung der Temperaturanomalie bei der Vernachlässigung (links) und Berücksichtigung (rechts) des Aquitards.**

### 3.1.5 Zusammenfassung und Fazit

Die durchgeführten Analysen haben Folgendes ergeben.

- Aufgrund der unterschiedlichen Vereinfachungen führen die jeweiligen Modelle zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen.
- Hydraulische Effekte durch die Grundwasserinjektion haben signifikante Auswirkungen auf die resultierende Temperaturanomalie.
- Bei detaillierten Wärmetransportmodellen sollte der Aquitard unbedingt mitberücksichtigt werden.
- Verlässliche Simulationsergebnisse können nur erzielt werden, wenn die Materialparameter, hydraulischen und thermischen Randbedingungen im Feld genau erfasst werden können.

Aus den sich ergebenden Ergebnissen haben wir das Fazit gezogen, dass eine belastbare Chancen- und Risikoanalyse nur standortspezifisch durchgeführt werden kann. Für eine erste Abschätzung der Ausbreitung der thermischen Anomalie durch die Nutzung einer Grundwasserwärmepumpe reichen die analytischen Ansätze aus. Um genauere Aussagen über die Temperaturanomalie im Untergrund treffen zu können, sollten u.U., z.B. bei größeren Anlagen, detaillierte numerische Modelle verwendet werden.

## 4 Geschlossene Systeme

### 4.1 Testfeld Vegas

#### 4.1.1 Überblick

Im Rahmen des Kooperationsprojektes wurde ein geothermischer Großversuch in enger Zusammenarbeit mit den drei Projektpartnern geplant, aufgebaut und durchgeführt. Dieser Versuch soll einen detaillierten Einblick in die Prozesse der Wärmeausbreitung um eine oder mehrere Erdwärmesonden (EWS) unter kontrollierten Bedingungen ermöglichen.

Der künstliche Aquifer des Versuchscontainers besteht aus insgesamt fünf verschiedenen Sandschichten (Abbildung 17). Dieser heterogene Aquifer baut sich aus zwei Feinsand-, zwei Mittelsand- und einer Grobsandschicht auf. Die Größe des Containers und somit des künstlichen Aquifers beträgt 9 m x 6 m x 4,5 m (Länge x Breite x Tiefe). Die einzelnen Schichten weisen eine leichte Neigung auf. Sowohl die hydraulischen als auch die thermischen Eigenschaften der unterschiedlichen Schichten sind aus vorrangigen Untersuchungen bekannt. Der hydraulische Gradient des künstlichen Aquifers kann eingestellt und während eines Experimentes permanent kontrolliert werden. In den Aquifer wurden vier EWS eingebaut, die einzeln angesteuert werden können. Die EWS bestehen aus Doppel U-Sonden und wurden mit dem Material GWE ThermoSeal<sup>®</sup> hinterfüllt. Die vier EWS sind mit einem Heizgerät verbunden. Während eines Versuchs können die Eingangs- und Ausgangstemperaturen sowie der Volumenstrom des Wärmeträgerfluides kontinuierlich aufgezeichnet werden. Des Weiteren wird die Temperaturentwicklung innerhalb des Aquifers durch ein hoch aufgelöstes Temperatursensorennetz gemessen. Eine detaillierte Beschreibung befindet sich im Abschlussbericht unseres Kooperationspartners der Universität Stuttgart.

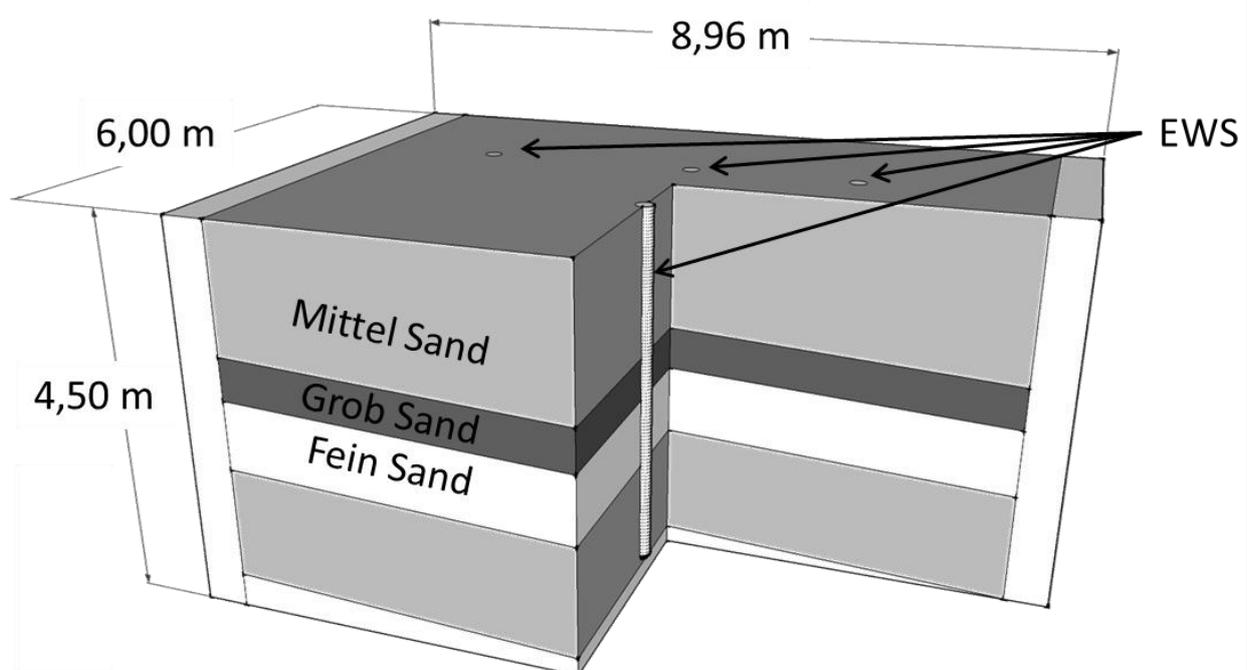


Abbildung 17: Schematischer Aufbau des künstlichen Aquifers im Vegas Container.

### 4.1.2 Analytische Modelle

Die analytischen Modelle beschreiben die Temperaturlausbreitung unter bestimmten Annahmen. Wird der Wärmetransport im Untergrund durch die Konduktion dominiert, kann die Temperaturänderung  $\Delta T$  um die EWS mittels der Kelvinschen Linienquelle beschrieben werden:

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4\kappa t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda} E_i \left[ \frac{r^2}{4\kappa t} \right] \approx \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ \ln \left( \frac{4\kappa t}{r^2} \right) - \gamma \right] \quad (16)$$

Hierbei ist  $q$  die Entzugsleistung ( $W m^{-1}$ ),  $\lambda$  die thermische Leitfähigkeit ( $W m K^{-1}$ ),  $r$  der Radius (m),  $t$  die Zeit (s) und  $\kappa$  die thermische Diffusivität ( $m^2 s^{-1}$ ). Tritt neben der Konduktion zusätzlich konvektiver Wärmetransport auf, verlieren die Annahmen der Kelvinschen Linienquelle ihre Gültigkeit. Um die zusätzliche Konvektion berücksichtigen zu können, kann die „Moving-Linesource“ angewendet werden.

$$\Delta T(x, y, t) = \frac{q}{4\pi c_{pm} \sqrt{D_l D_t}} \exp \left[ \frac{v_{th} x}{2D_l} \right] \int_0^{\frac{v_{th}^2 t}{4D_l}} \exp \left[ - \left( \frac{x^2}{D_l} + \frac{y^2}{D_t} \right) \frac{v_{th}^2}{16D_l u} - u \right] \frac{du}{u} \quad (17)$$

Hierbei bezeichnen  $x$  und  $y$  die kartesischen Koordinaten (m) und  $c_{pm}$  die volumetrische Wärmekapazität des porösen Mediums ( $J (m^3 K)^{-1}$ ).

Die longitudinal und transversale thermische Dispersion ( $D_l$  und  $D_t$ ) sowie die retardierte thermische Geschwindigkeit  $v_{th}$  können mit Hilfe von Gleichung 18-20 berechnet werden.

$$v_{th} = v \frac{c_{pw}}{c_{pm}} \quad (18)$$

$$D_l = \frac{\lambda}{c_{pm}} + \alpha_l v_{th} \quad (19)$$

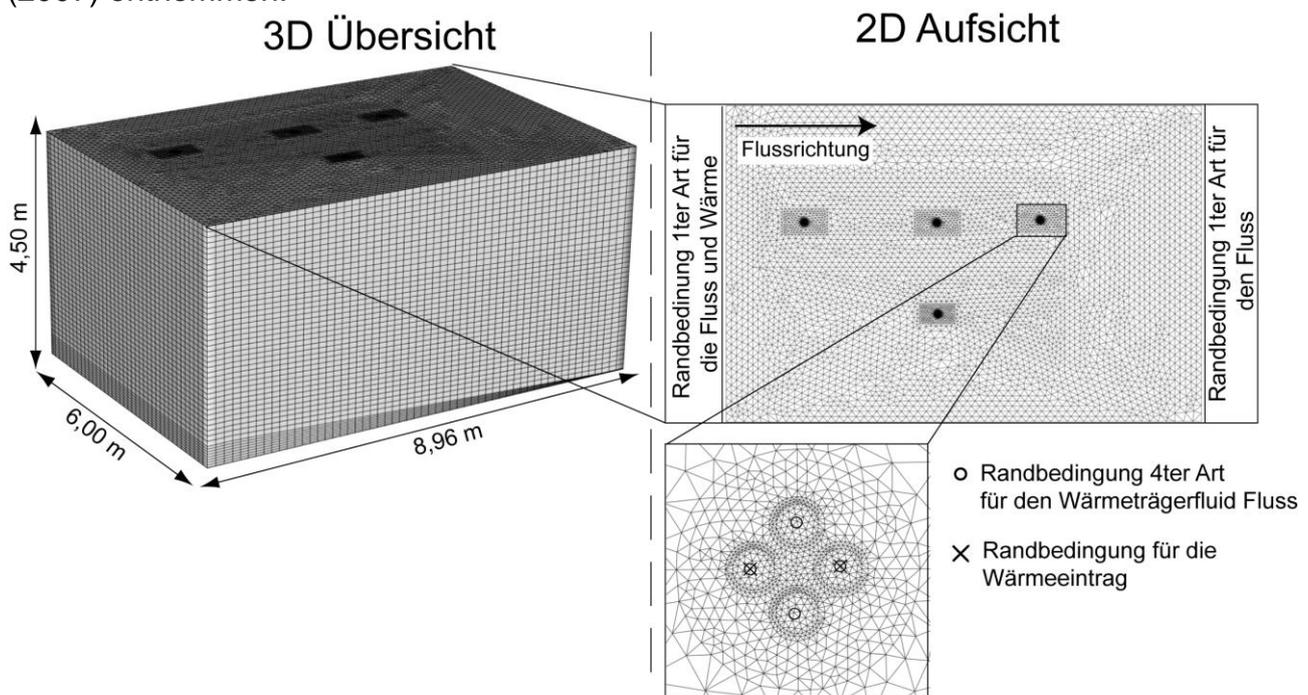
$$D_t = \frac{\lambda}{c_{pm}} + \alpha_t v_{th} \quad (20)$$

Hierbei ist  $v$  die Darcy Geschwindigkeit ( $m s^{-1}$ ),  $c_{pw}$  die volumetrische Wärmekapazität des Wassers ( $J (m^3 K)^{-1}$ ) und  $\alpha_l / \alpha_t$  die thermische Dispersivität (m). Beide analytischen Modelle nehmen den Untergrund als homogenes, isotropes und unendlich ausgedehntes Medium an. Die EWS wird als eine konstant betriebene und in vertikaler Richtung unendlich ausgedehnte Linienquelle angenommen, daher können eventuelle vertikal orientierte Effekte nicht berücksichtigt werden. Mittels des Prinzips der Superposition ist es möglich, das Anwendungsspektrum von Gleichung 16 und 17 zu erweitern. Dadurch ist es beispielsweise möglich, die Temperaturänderung, verursacht durch variable Heizlasten oder die Temperaturfahne, die von mehreren Wärmequellen (EWS) hervorgerufen wird, zu berechnen. Das Prinzip der zeitlichen Superposition wird unter anderem in der Arbeit von Michopoulos und Kyriakis (2009) genauer erläutert, das der räumlichen Superposition zum Beispiel in den Arbeiten von Diao et al. (2004) und de Paly et al. (2012).

### 4.1.3 Numerisches Modell

Um die heterogenen Bedingungen des Systems EWS und Untergrund zu berücksichtigen, eignen sich numerische Simulationen. Hierbei ist es möglich, zeitlich nicht konstante

Randbedingungen zu berücksichtigen, wie sie bei fluktuierenden Temperaturen an der Erdoberfläche oder schwankenden Entzugsleistungen der EWS vorkommen. Des Weiteren kann, falls erforderlich, ein numerisches Modell die geometrischen Besonderheiten des Untergrundes und der EWS berücksichtigen, wie zum Beispiel ein heterogener Untergrund. Für den Versuchsstandort VEGAS wurde ein drei-dimensionales numerisches Modell in dem Simulationsprogramm FEFLOW (Version 5.4) entwickelt. Der Modellansatz für eine voll ausdiskretisierte EWS wurde aus der Arbeit von Signorelli et al. (2007) entnommen.



**Abbildung 18:** Links: 3D Übersicht des entwickelten Modells und seine Diskretisierung. Rechts: 2D Aufsicht des Modells und die gewählten Randbedingungen.

Das numerische Modell hat dieselbe Größe wie der Versuchscontainer. Die Position und Lage der fünf Sandschichten wurde exakt in dem numerischen Modell abgebildet. Das Modell besteht aus 804.433 prismatischen finiten Elementen, die sich gleichmäßig auf die 49 Schichten des Modells verteilen. Die Auflösung der horizontalen Diskretisierung nimmt zu den Erdwärmesonden hin zu und erreicht ihr Maximum an den Wänden der Doppel U-Rohre, weil hier die höchsten Temperaturgradienten zu erwartet sind. Um in der Lage zu sein, die komplette thermische Interaktion zwischen Wärmeträgerfluid und Untergrund zu berücksichtigen, wird in diesem numerischen Modell der Wärmeträgerfluidstrom innerhalb der Rohre ebenfalls simuliert. Dies führt auf Grund der hohen Fließgeschwindigkeiten des Wärmeträgerfluides zu diversen Problemen. Zum einen kann man nicht mehr von einem laminaren Darcy-Fließverhalten ausgegangen werden und zum anderen erfordert diese hohe Fließgeschwindigkeit eine besonders hoch aufgelöste Diskretisierung im Bereich der Rohre, die eine praktikable Simulationsdauer unmöglich macht.

Signorelli et al. (2007) haben gezeigt, dass eine sehr praktikable Möglichkeit zur Vermeidung dieser Problematik bei der Finiten-Element Modellierung die Verwendung von DFEs ist. Diese DFEs stellen Elemente niederer Dimension innerhalb des höher dimensional Finite-Element Netzes dar. Somit muss die Auflösung des eigentlichen Finite-Element Netzes nicht an die Fließgeschwindigkeitsanforderungen des Wärmeträgerfluides angepasst werden und es ergibt sich ein rechenzeiteffizienter Simulationsansatz.

Die Finten-Elemente, die das Rohrinne darstellen, haben einen sehr geringen  $k_f$  Wert, um eine hydraulische Interaktion zwischen dem Fluidstrom innerhalb des DFE und dem 3D Finite-Element Netz zu verhindern. Des Weiteren haben diese Elemente eine hohe thermische Diffusivität, um das Wärmetransportverhalten eines turbulent fließenden Fluides abzubilden.

Die hydraulischen und thermischen Randbedingungen, die während des Versuches gemessen wurden, können so ebenfalls in der numerischen Simulation berücksichtigt werden. Es wurde der Temperaturverlauf des in den Container einströmenden Grundwassers und des zirkulierenden Wärmeträgerfluides aufgezeichnet und so in die numerische Simulation implementiert. Des Weiteren wurde der eingestellte hydraulische Gradient des Experimentes ebenfalls in die Simulation übertragen. Der gemessene Volumenstrom des Wärmeträgerfluides ist ebenfalls in der Simulation berücksichtigt. Die thermischen und hydraulischen Materialeigenschaften des künstlichen Aquifers sind aus vorangegangenen Untersuchungen an diesem Versuchsstand bekannt Tabelle 2.

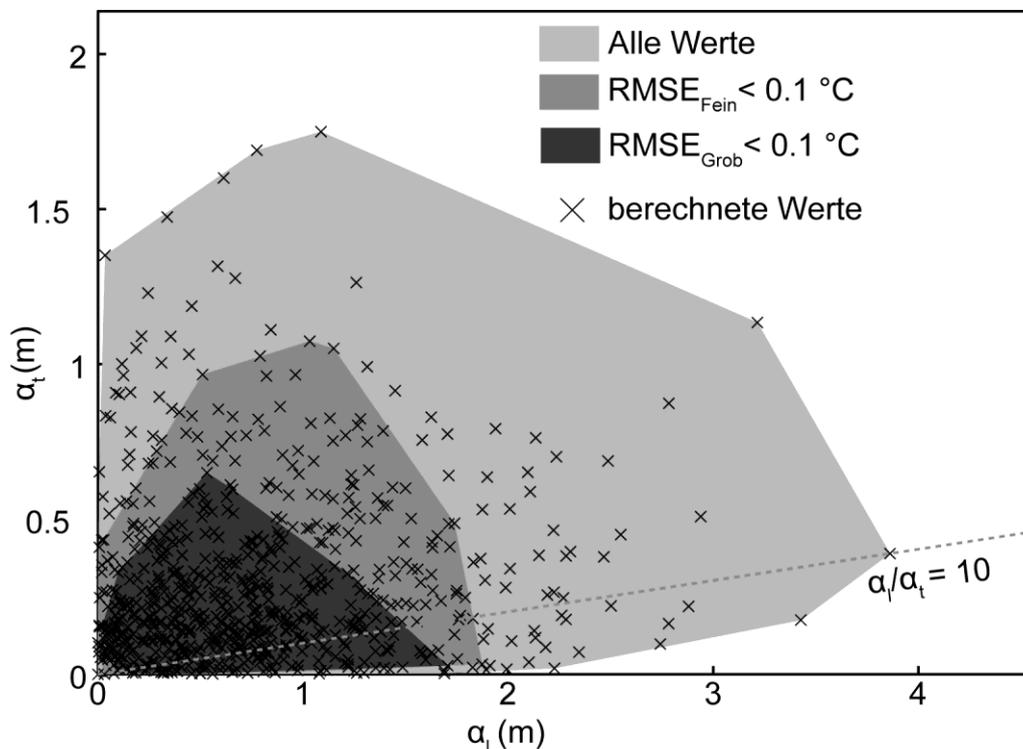
#### 4.1.4 Berechnungen

Für den Vergleich der unterschiedlichen vorgestellten Berechnungsmethoden wurden zwei Experimente, die durch den Kooperationspartner der Universität Stuttgart durchgeführt worden sind, genauer untersucht. Während des ersten Experimentes wurde die EWS 2 (Anlage 3) für 22 Tage mit einer möglichst konstanten Fluideingangstemperatur betrieben. Bei dem zweiten Experiment handelt es sich um einen 8-tägigen Thermal Response Test (TRT), der an der EWS 4 (Anlage 3) durchgeführt wurde. Der TRT umfasst eine Heizphase von drei Tagen und eine 5-tägige Abkühlphase. Eine detaillierte Zusammenstellung aller durchgeführten Experimente befindet sich im Abschlussbericht der Universität Stuttgart (Bisch und Klaas, 2012).

Anhand des ersten Experiments wurde die Sensitivität des entwickelten numerischen Modells auf Änderungen der Dispersivitäten untersucht. Ein Vergleich mit der analytischen Lösung ist basierend auf diesem Experiment nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich, da die EWS mit einer konstanten Eingangstemperatur betrieben wird und nicht mit einer konstanten Heizleistung, wie es die analytische Lösung annimmt. Die hydraulischen und thermischen Parameter des Experiments sind bekannt (Tabelle 1). Einzig die longitudinale und transversale Dispersivität ist nicht bekannt, so dass in der durchgeführten Monte-Carlo-Analyse nur diese beiden Werte der einzelnen Schichten variiert wurden. Hierzu wurde das numerische Modell in eine spezielle entwickelte automatisierte Parameteranpassungsroutine integriert. Bei der Monte-Carlo-Analyse wurden die Abweichungen der gemessenen und der berechneten Temperaturänderung für verschiedene zufällig generierte Dispersivitäts-Kombinationen quantifiziert. Aufgrund der zu erwartenden Randeffekte auf die Temperaturmessungen, die in der oberen beziehungsweise unteren Mittelsandschicht auf Grund ihrer Lage zu erwarten sind, wurden diese beiden Schichten aus der Sensitivitätsanalyse ausgeklammert.

In Abbildung 19 ist das Ergebnis der durchgeführten Analyse für die Grob- und Feinsandschicht dargestellt. Die Analyse zeigt, dass sich ein minimaler Fehler (RMSE) von  $< 0.1$  °C für einen großen longitudinalen und transversalen Dispersivitätsbereich ergibt. Die bestimmten Wertebereiche für die Grobsandschicht sind kleiner als der Bereich für die Feinsandschicht. Daher ist das Modell sensitiver auf Dispersivitätsänderungen in der Grobsandschicht. Dies ist auf die größere advective Komponente des Wärmetransportes zurückzuführen. Des Weiteren verdeutlichen die erzielten Werte, dass das standardmäßig

angenommene Verhältnis von  $\alpha_l / \alpha_t = 10$  nicht ausschließlich gültig ist. Die Parameteranpassung ergibt auch Dispersitätskombinationen mit deutlich abweichenden Verhältnissen.



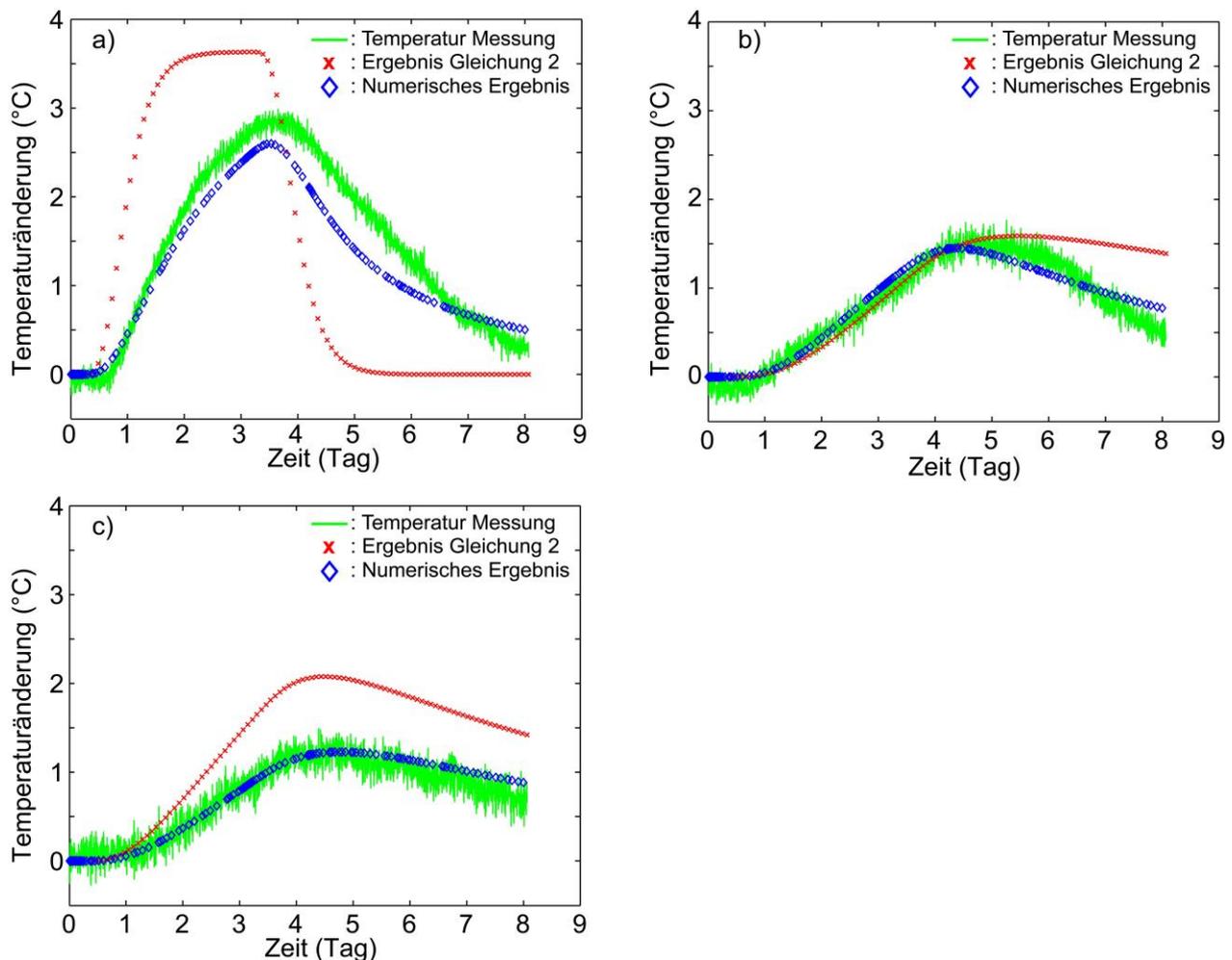
**Abbildung 19:** Resultat der Monte-Carlo-Analyse des Wärmetransportexperimentes an der Universität Stuttgart. Während der Analyse wurden nur die Parameter  $\alpha_l$  und  $\alpha_t$  variiert, um eine optimale Anpassung zwischen den gemessenen Temperaturverläufen und den simulierten Temperatur zu erzielen.

Das zweite Experiment, der durchgeführte Thermal Response Test, eignet sich besonders für den Vergleich der numerischen und der analytischen Modelle, da hier die EWS mit einer annähernd konstanten Heizleistung betrieben wurde. Dies erleichtert die Verwendung der analytischen Gleichung (Gleichung 17). Die gesamte Versuchsdauer von acht Tagen kann in eine 3-tägige Heizperiode und eine fünftägige Abkühlphase unterteilt werden. Hierbei wurde während der Heizphase eine thermische Leistung von  $133 \text{ W m}^{-1}$  an die EWS angelegt. Während der Abkühlphase wurde das TRT-Gerät abgeschaltet, aber weiterhin die Temperaturen kontinuierlich aufgezeichnet. Die Eingangsparameter für die numerische und analytische Simulation wurden aufgrund der bekannten Eigenschaften des Containers gewählt. Um die Temperatursausbreitung in den drei unterschiedlichen Schichten mittels Gleichung 17 zu berechnen, wurden für jede Schicht separate Einzelsimulationen durchgeführt. Bei der Auswertung des zweiten Experimentes wurde nur die 1 m entfernte Messstelle B4 berücksichtigt. Basierend auf der geringen räumlichen und zeitlichen Skala des beobachteten Bereichs, würden für diese Auswertung die beiden skalenabhängigen Parameter  $\alpha_l$  und  $\alpha_t$  gleich Null gesetzt.

**Tabelle 2. Hydraulische und thermische Eigenschaften der unterschiedlichen Schichten des VEGAS Containers.**

	Feinsand Schicht	Mittelsand Schicht	Grobsand Schicht
Porosität, $n$ , ( )	0,44	0,35	0,40
thermische Leitfähigkeit, $\lambda$ , W (m K) <sup>-1</sup>	2,63	3,30	2,91
volumetrische Wärmekapazität, $c_p$ , (J (m <sup>3</sup> K) <sup>-1</sup> )	$2,88 \times 10^6$	$2,67 \times 10^6$	$2,79 \times 10^6$
hydraulische Leitfähigkeit, $k_f$ , (m s <sup>-1</sup> )	$2 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$	$45 \times 10^{-4}$

Betrachtet man nun das Ergebniss der Temperaturmessung an der Messstelle B4 (Anlage 3) und der Berechnung mittels Gleichung 17 zeigen sich für das Ergebnis der Grobsandschicht deutliche Unterschiede sowohl im Wertespektrum der Temperatur als auch in dem Verlauf der Temperaturkurven. Hingegen zeigt sich für die Feinsandschicht eine sehr präzise Übereinstimmung des berechneten Temperaturänderungsintervall und für die Mittelsandschicht eine gute Übereinstimmung des Temperaturkurvenverlaufes.



**Abbildung 20. Vergleich der gemessenen, analytisch und numerisch berechneten Temperaturänderungen an der Messstelle B4 während eines 8-tägigen TRTs im VEGAS-Container. a) Temperaturänderung in der Grobsandschicht; b) Temperaturänderung in der Feinsandschicht; c) Temperaturänderung in der unteren Mittelsandschicht.**

Der Vergleich der gemessenen Temperaturwerte mit dem numerischen Ergebnissen zeigt eine sehr hohe Übereinstimmung für die Grobsand-, untere Mittelsand- und Feinsandschicht.

#### 4.1.5 Zusammenfassung und Fazit

Die durchgeführten Analysen haben folgendes ergeben.

- Dispersivitätseinflüsse haben in advektionsbeeinflussten Systemen einen relevanten Effekt auf den Wärmetransport im Untergrund.
- Das standartmäßig angenommene Verhältnis von  $\alpha_l / \alpha_t = 10$  ist nicht ausschließlich gültig.
- Unter Verwendung der gemessenen Materialeigenschaften und Randbedingungen kann mithilfe eines numerischen Wärmetransportmodells die Temperaturlausbreitung im Untergrund präzise berechnet werden.
- Unter Verwendung der gemessenen Materialeigenschaften und Randbedingungen kann mittels Gleichung 17 nur eine grobe Abschätzung der resultierenden Temperaturanomale erfolgen.

Aus den Ergebnissen haben wir das Fazit gezogen, dass nur eine numerische Detailsimulation die Grundlage für ein fundiertes und komplexeres Genehmigungsverfahren sein kann, sofern der Standort präzise im Modell beschrieben werden kann. Ist der Untergrund homogen und konduktionsdominiert sollte der Einsatz von einfacheren Modellen jedoch vollkommen ausreichen. Des Weiteren stellen die analytischen Gleichungen eine adäquate und konservative Möglichkeit für eine erste Abschätzung der Temperaturausbreitung dar.

## 4.2 Testfeld Bad Wurzach

### 4.2.1 Überblick

Wie der geologischen Übersichtskarte von Weinszieher (1984) und der Geologischen Karte Blatt 25 (Anhang 2) zu entnehmen ist, liegt der Standort am Rande des Wurzacher Rieds und es stehen quartäre Niederterrassenkiese an. Von der Torfbildung ist der Standort nicht beeinflusst. Diese Literaturangaben werden auch vom Bohrprofil der EWS (Anlage 4) bestätigt. Außerdem kann hieraus entnommen werden, dass die Niederterrassenkiese von Beckentonen unterlagert werden. Die quartäre Schichtung ist bis 58 m u. GOK anzutreffen. Darauf folgen die sedimentären Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse. Diese besteht hier aus einer Wechsellagerung von Feinsandstein, Mergelstein und Mergellagen (Anlage 4). Da die Bohrungen des Testfeldes nur im oberen Niederterrassenkies niedergebracht wurden, sind die genauen Ablagerungsverhältnisse der Molasse hier zu vernachlässigen. Jedoch ist eine genaue Betrachtung der Kiese notwendig um hydrogeologische Erkenntnisse zu erlangen. Die Aquifereigenschaften werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

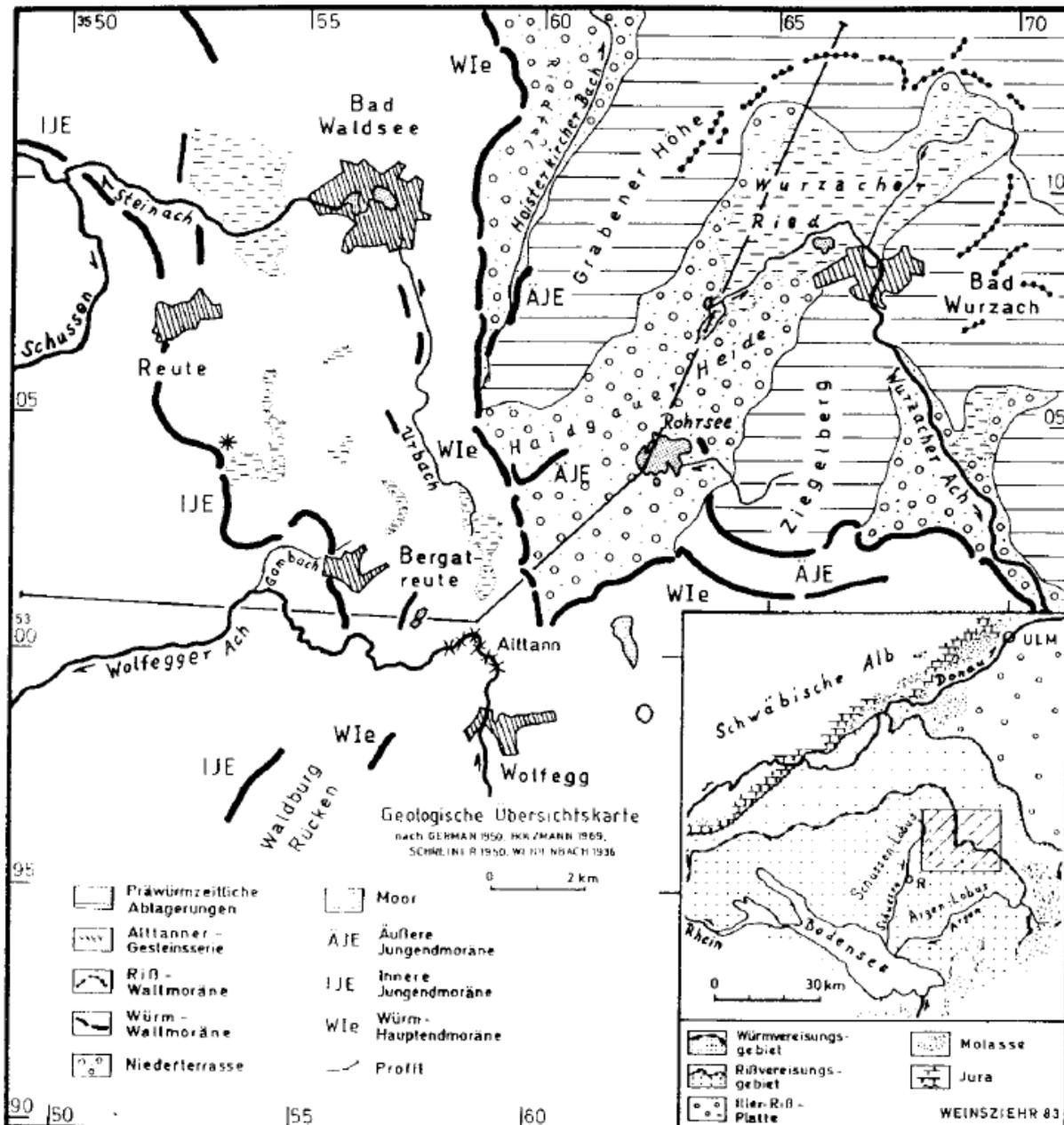
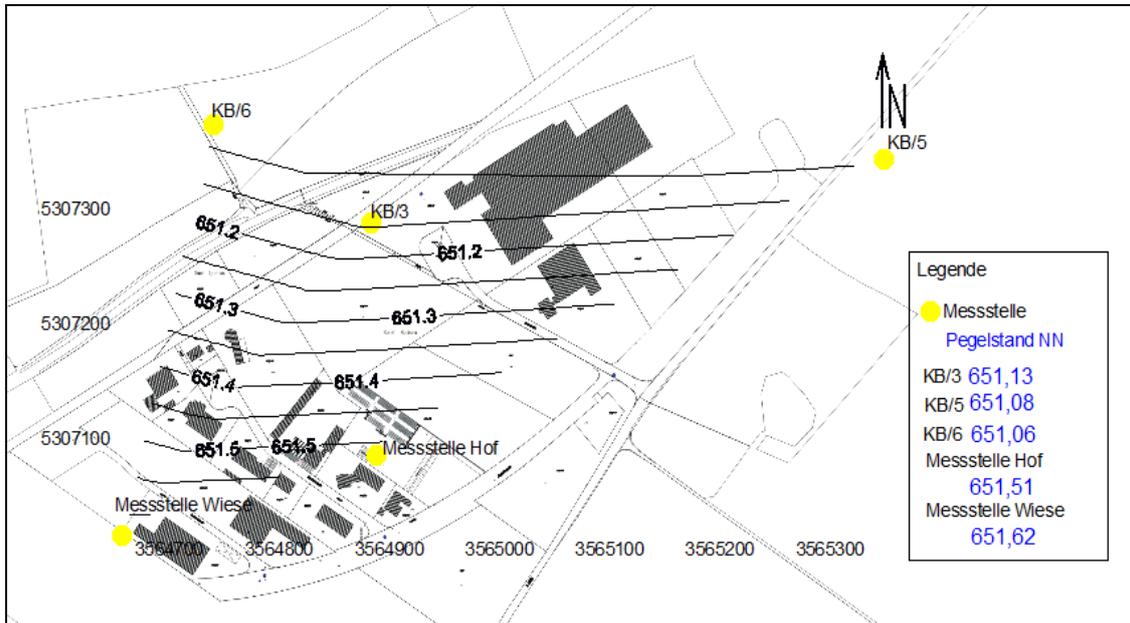


Abbildung 21: Geologische Übersichtskarte Schussen Becken und Wurzacher Becken (Weinszieher, 1984)

Alle Temperaturmessungen in dieser Arbeit finden im oberen Grundwasserleiter statt. Als Grundwassersohle, die das Wasser staut wirken im Wurzacher Becken verschiedene Schichten. Zum einen sind es die Schichten der Oberen Süßwassermolasse zum anderen kommen Moränenablagerungen (Geschiebemergel) oder Beckentone in Frage (Ebel, 1991). Der Grundwasserleiter besteht aus Kiesen einer quartären Niederterrassenablagerung. Die Kiese wurden nach einer eiszeitlichen Auswaschung des Beckens abgelagert und keilen am Rand des Beckens aus. Ihre Mächtigkeit schwankt zwischen 15 und 25 m. Der Porengrundwasserleiter, der aus diesen Kiesen besteht, zeichnet sich durch eine hohe Durchlässigkeit und Porosität aus. Am Standort befinden wir uns am Rande des Beckens, die Grundwassersohle kann bei ca. 20 m u. GOK angenommen werden (Ebel, 1991). Was sich auch im Profil der Erdwärmesonde bestätigt, der obere

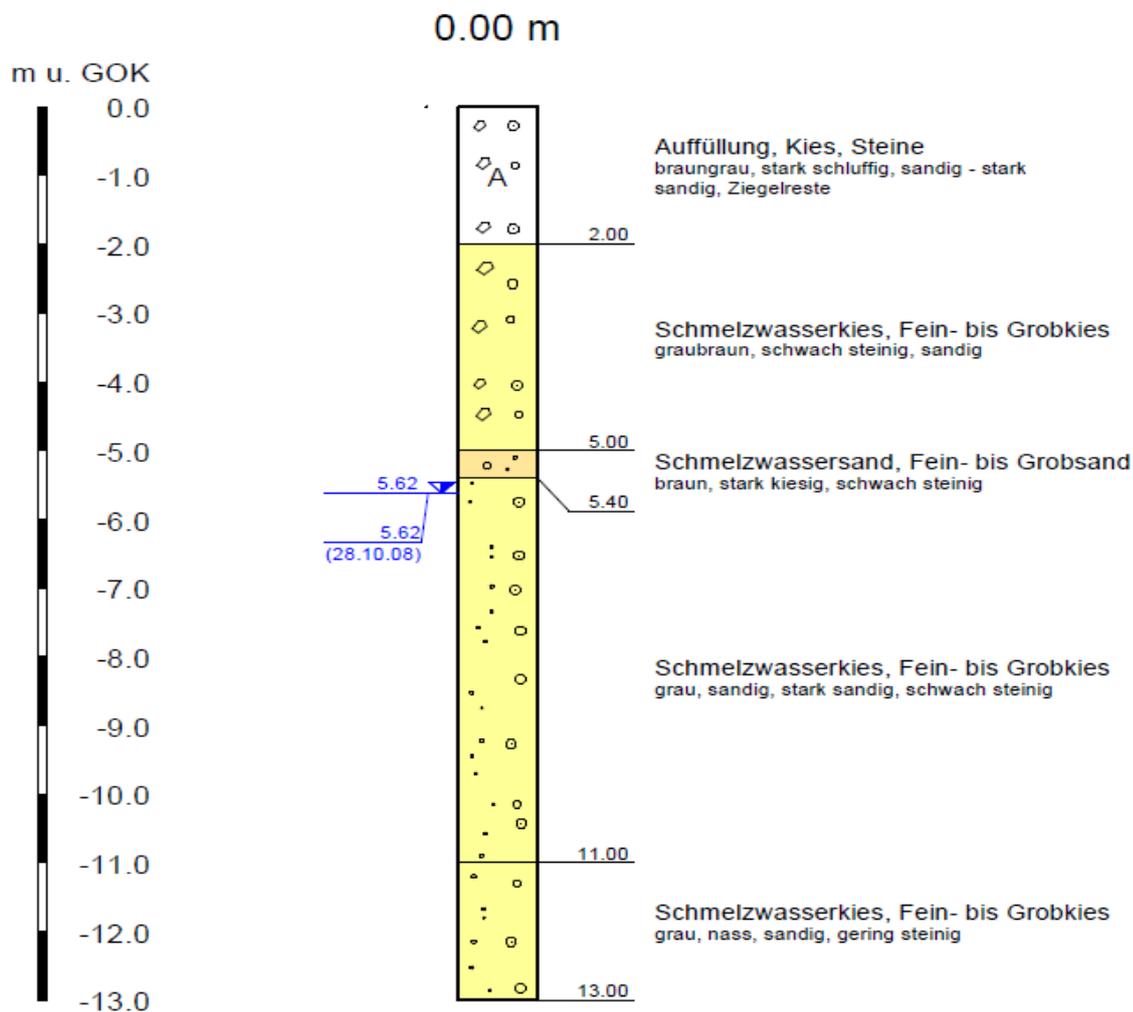
Kiesaquifer wird bei 23 m u. GOK durch Beckentone gestaut. Darunter folgt ein weiterer, schmaler Kieshorizont, der aber nicht wasserführend ist.



**Abbildung 22: Grundwassergleichenplan erstellt mithilfe der triangularen Interpolationsmethode in Sufer. Als Datengrundlage dient die Stichtagsmessungen vom 05.08.2010.**

Der Grundwassergleichenplan, der in Abbildung 22 dargestellt ist, zeigt eine Grundwasserfließrichtung nach Norden an. Des Weiteren ergibt sich aus dem Grundwassergleichenplan ein hydraulischer Gradient von 0,002. Der Aquifer in dem die Kältefahne gemessen werden soll befindet sich in den quartären Kiesablagerungen, diese gliedern sich nach dem Profil einer Brunnenbohrung auf dem Nachbargrundstück wie folgt:

## EB 1/08



**Abbildung 23: Profil einer Brunnenbohrung in ca. 500 m Entfernung des BauGrund Süd Geländes.**

Aus dem Profil ist zu entnehmen, dass es sich um einen inhomogenen Porengrundwasserleiter handelt. Die Korngrößen wechseln von Sand zu Grobkies und es ist davon auszugehen, dass sich in den Niederterrassenkiesen zum Teil größere Sandlinsen befinden. Nach dem Profil der EWS ist in dieser Brunnenbohrung nicht der gesamte Aquifer aufgeschlossen. Die Bohrung der EWS zeigt, dass der Grundwasserleiter bis zu einer Tiefe von 23 m u. GOK reicht (Anlage 4). Basierend auf den beiden Bohrprofilen aus Abbildung 23 und Anlage 4 kann der obere Aquifer zu einer Einheit zusammengefasst werden. Diesem Aquifer wird eine hydraulische Leitfähigkeit zugeordnet, die mittels eines Langzeitpumpversuches bestimmt wurde. In diesem Langzeitpumpversuch konnte ein  $k_f$ -Wert von  $0,007 \text{ m s}^{-1}$  ermittelt werden (Weinszieher, 1984).

Der Aufbau des Temperaturmessnetzes wurde von dem Kooperationspartner der Universität Stuttgart vorgenommen. Gisch und Klaas (2012) geben eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus. Insgesamt wird die Temperaturfahne der EWS an vier verschiedenen Positionen im Abstrombereich aufgezeichnet (Anlage 5).

## 4.2.2 Analytische Modelle

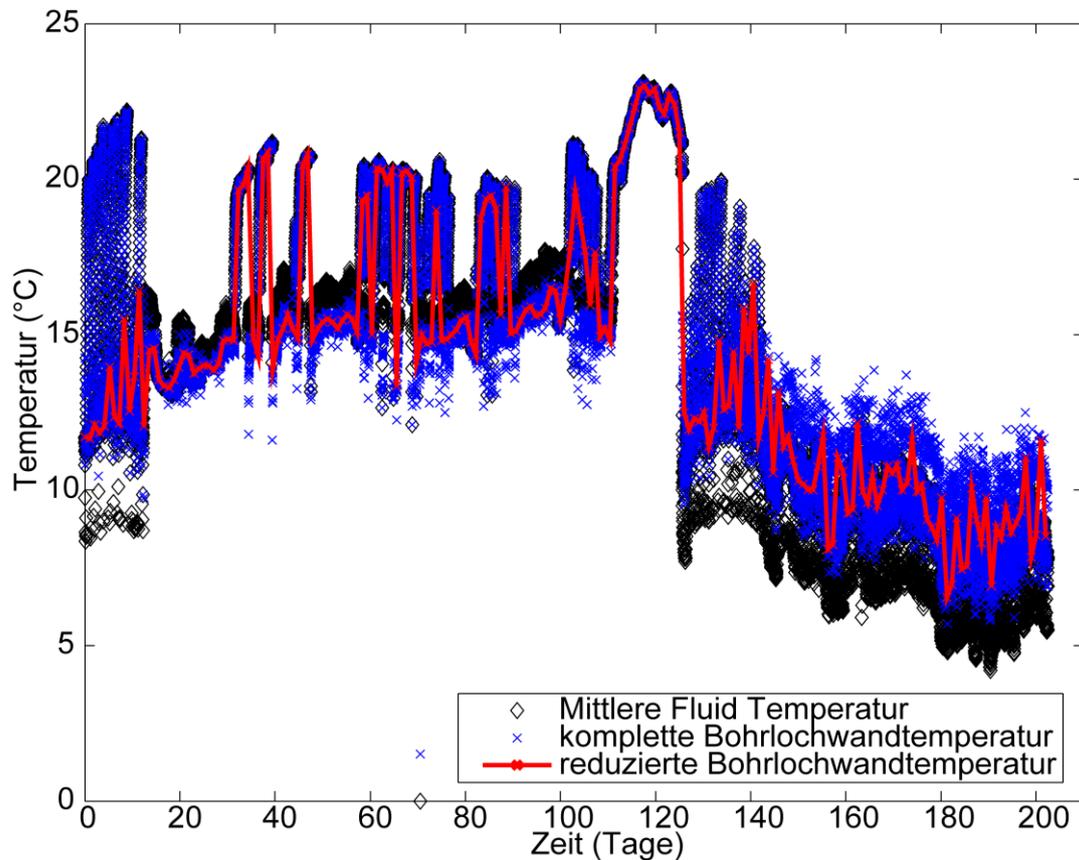
Für die Berechnungen am Standort Bad Wurzach werden dieselben analytischen Modelle verwendet, die bereits für die Analyse des VEGAS-Experiment verwendet worden sind und in Kapitel 4.1.2 vorgestellt wurden.

## 4.2.3 Numerisches Modell

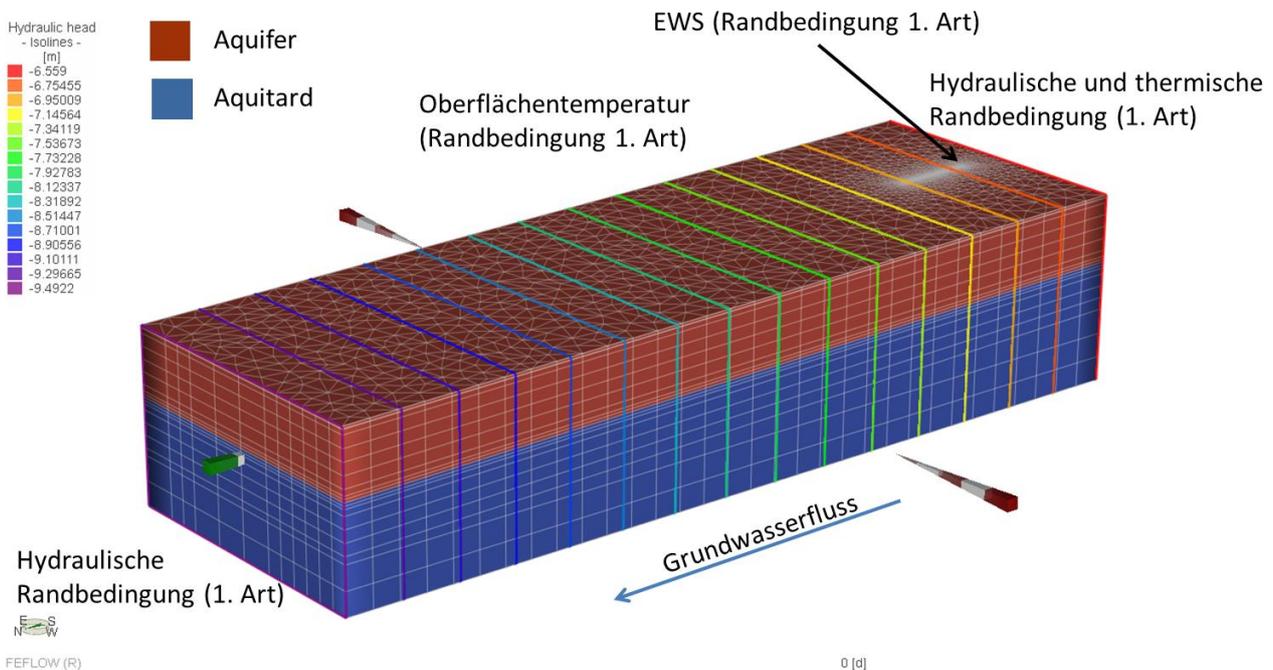
Für das numerische Modell des Standorts Bad Wurzach wurde jedoch ein anderer Modellansatz gewählt, da die Geometrie der EWS nicht signifikant für das Temperaturfeld ist und ein weniger rechenintensives Modell für die Berücksichtigung des komplexen Heizlastprofils erforderlich ist. In Anlage 6 ist der gemessene Temperaturverlauf des Wärmeträgerfluides dargestellt. Der Betrieb der EWS umfasst eine Kühl- und eine Heizphase, aber die Taktung der Wärmepumpe und somit die thermische Leistung der EWS ist zeitlich sehr variabel. Zum einen widerspricht dies der Annahme der vorgestellten analytischen Gleichungen von einer konstanten Heizleistung. Zum anderen stellt dieses zeitlich hochfrequent schwankende Quellensignal eine sehr große Herausforderung für ein numerisches Modell dar.

Da der Fokus dieses Teilprojektes in der Fernfelduntersuchung liegt, wurde der numerische Aufwand durch eine vereinfachte numerische Darstellung der EWS verringert. Hierbei haben wir auf die Verwendung einer voll ausdiskretisierten EWS verzichtet und analog zum Ansatz des Thermal Response Tests der Temperaturübergang zwischen Wärmeträgerfluid und Bohrlochwand vereinfacht durch einen Bohrlochwiderstands-Term berechnet. Hierzu wurde der Bohrlochwiderstand, der von der Firma BauGrund Süd für die EWS bestimmt wurde, mit der gemessenen thermischen Leistung der EWS multipliziert und von der gemessenen mittleren Fluidtemperatur abgezogen (Abbildung 24). Das resultierende Ergebnis stellt den zeitlichen Verlauf der Bohrlochwandtemperatur dar.

Die EWS wird somit als 1D-Linienelement dargestellt, das mit dem Untergrund interagiert. Auf diese Weise kann der variable Betrieb der EWS in eine 3D-Simulation implementiert werden. Die hydraulischen Randbedingungen wurden auf Grund der Stichtagsmessungen vom 05.08.2010 und dem resultierenden Gleichenplan gesetzt (Abbildung 22). Die thermischen Randbedingungen wurden auf Grund der gemessenen Temperaturtiefenprofile gewählt. Hierbei wurde die initiale Temperatur des Untergrundes ermittelt und in das numerische Modell übertragen. Des Weiteren wird die Temperatur an der Oberfläche des Aquifers aus den Temperaturtiefenprofilen bestimmt. Analysen haben gezeigt dass der geothermische Wärmestrom bei extrem oberflächennahen Aquiferen vernachlässigt werden kann (Cless, 2012). Für die Wärmebilanz zur Berechnung der Temperaturentbreitung des Aquifers reicht eine Berücksichtigung des Aquitards und seiner initialen Temperatur aus.



**Abbildung 24: Vergleich von mittlerer Fluidtemperatur und berechneter Bohrlöchwandtemperatur. Die reduzierte Bohrlöchwandtemperatur berücksichtigt nur die relevanten Messpunkte, um den Verlauf der Temperaturkurve präzise darzustellen.**



**Abbildung 25: Überblick des entwickelten FEFLOW-Modells und den verwendeten Randbedingungen.**

Das numerische Modell berücksichtigt das Tiefenintervall des Untergrundes, das durch die Temperaturmessungen überwacht worden ist. Es werden zwei generelle Einheiten des

Untergrundes im Modell voneinander getrennt, die sich in ihren hydraulischen und thermischen Eigenschaften unterscheiden. Ein oberer Aquiferbereich und ein unterer Aquitardbereich. Die jeweiligen Parameter wurden auf Grund der durchgeführten Literaturstudie bestimmt und sind in Tabelle 3 aufgeführt.

**Tabelle 3: Hydraulische und thermische Parameter des Standorts Bad Wurzach.**

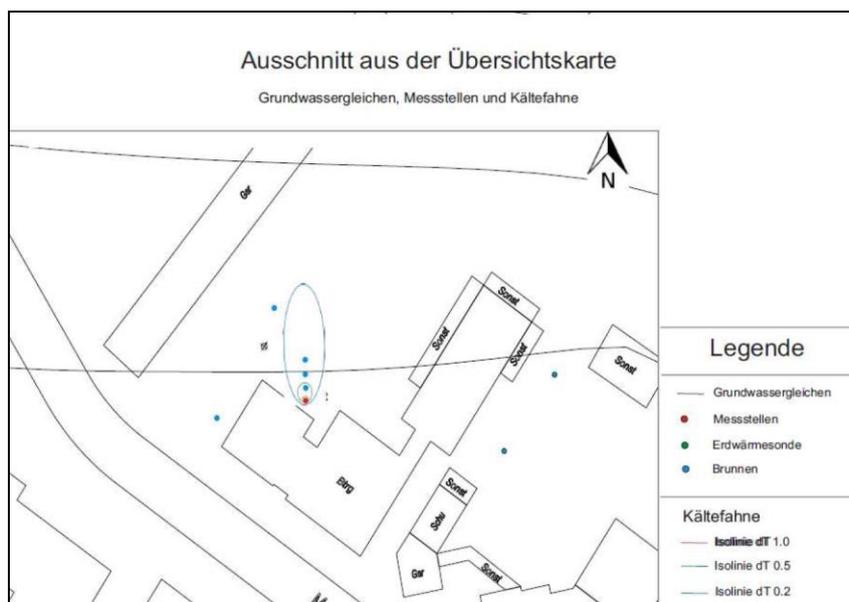
	Wert
Durchlässigkeitsbeiwert, $k_f$ ( $m s^{-1}$ )	0,007 <sup>a)</sup>
hydraulischer Gradient, $i$ ( )	0,002 <sup>b)</sup>
Porosität, $n$ ( )	0,35
longitudinale Dispersivität, $\alpha_l$ (m)	5
transversale Dispersivität, $\alpha_t$ (m)	5
volumetrische Wärmekapazität des porösen Mediums, $c_{pm}$ ( $J (m^3K)^{-1}$ )	$2,4 \times 10^6$
thermische Leitfähigkeit des porösen Mediums, $\lambda_m$ ( $W (m K)^{-1}$ )	1,4

<sup>a)</sup> Durchlässigkeitsbeiwert des Aquifers nach Langzeitpumpversuch in der Haidgauer Haide aus dem Jahr 1968 (Weinszieher, 1984); <sup>b)</sup> hydraulischer Gradient bestimmt aus dem Grundwassergleichenplan (Abbildung 22);

## 4.2.4 Berechnung

### 4.2.4.1 Analytische Berechnungen

Brandstetter (2011) hat basierend auf den Parametern, die durch die Standortanalyse gewonnen werden konnten, eine erste Abschätzung der Temperaturanomalie vorgenommen, die sich um die EWS herum ausbildet. Diese Abschätzung stellte die Grundlage für die spätere Errichtung des Testfeldes dar. Die Messkampagne beschränkt sich auf die Temperaturentwicklung im angetroffenen oberen Aquifer, daher wurde für die Berechnung nur auf Gleichung 17 zurückgegriffen. Die prognostizierte Temperaturfahne ist in Abbildung 26 dargestellt.



**Abbildung 26: Prognostizierte Temperaturfahne, die mittels Gleichung 17 berechnet wurde (Brandstetter, 2011).**

#### 4.2.4.2 Numerische Berechnungen

Für weiterführende Analysen des Testfeldes Bad Wurzach wurden die Temperaturmessreihen seit der Installation des Wärmemengenzählers herangezogen. Die untersuchte Zeitspanne erstreckt sich vom 13.05.2011 bis zum 06.12.2011. Der Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den gemessenen Temperaturzeitreihen ist in Abbildung 27 dargestellt. Die Übereinstimmung der Mess- und Simulationsergebnissen an der Position der Messstelle B1 sind sehr vielversprechend. Der sehr stark schwankende Temperaturgang kann qualitativ nachempfunden werden. Für die Positionen B2 bis B4 können die Messwerte hinreichend genau nachgerechnet werden, aber die Messwerte weisen eine deutlich Dämpfung der Temperaturwerte im Vergleich zur numerischen Simulation auf. Trotzdem ist das Ergebnis als Erfolg zu bewerten, da trotz der moderaten Informationsdichte die Geologie am Standort und der extrem variable EWS-Betrieb, die Temperaturentwicklung im Aquifer hinreichend genau prognostiziert werden kann und die numerischen Ergebnisse meist konservativer sind als die gemessenen Temperaturen im Untergrund.

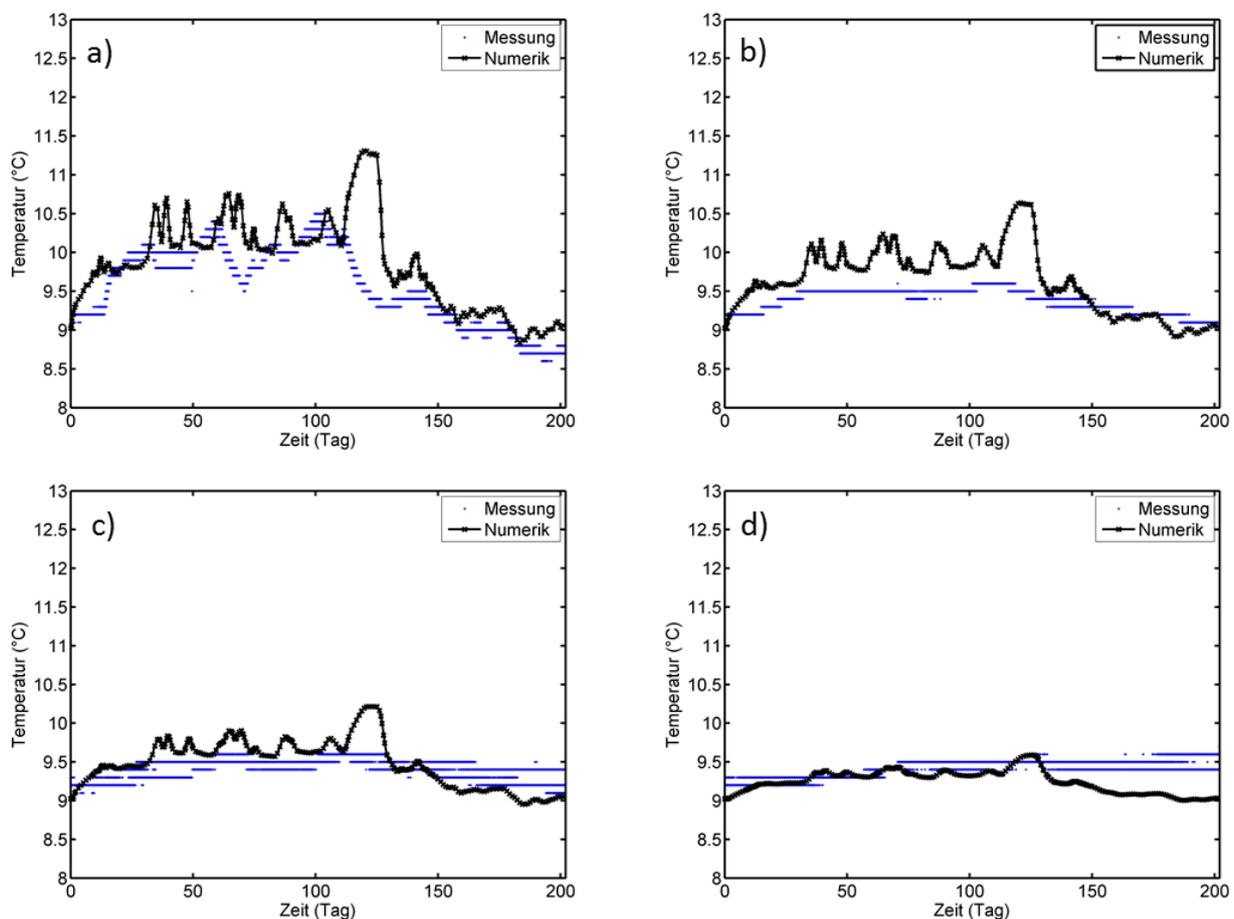


Abbildung 27: Vergleich der simulierten und berechneten Temperaturverläufe am Standort Bad Wurzach. a) Messposition B1; b) Messposition B2; c) Messposition B3; b) Messposition B4; (siehe Anlage 5).

#### 4.2.5 Zusammenfassung und Fazit

Die durchgeführten Analysen haben folgendes ergeben:

- 2D analytische Modelle sind für eine erste Vorabuntersuchung beziehungsweise Abschätzungen der Temperaturentwicklung im Untergrund geeignet.

- Numerische Simulationen unter Verwendung des verwendeten 1D-EWS Ansatzes sind in der Lage die thermische Interaktion zwischen EWS und Untergrund abzubilden.
- Die gemessene extreme Temperaturdämpfung im Testfeld Bad Wurzach innerhalb des Aquifers kann basierend auf der vorhandenen Datengrundlage nur hinreichend genau nachsimuliert werden. Eventuell führen Schwankungen des Grundwasserflusses zu dieser extremen Dämpfung des Temperatursignales.

## 5 Zusammenfassung und Fazit

Im 2. Teil des Kooperationsprojekts geomatrix.bw wurde ein Großtank- (Erdwärmesonde im VEGAS-Container) und zwei Feldexperimente mit geothermischen Anlagen (Erdwärmesonde bei Bad Wurzach und Grundwasserwärmepumpe in Kilchberg) mittels unterschiedlicher Simulationsansätze durchgeführt und detailliert untersucht. Hierbei zeigte sich, dass präzise Aussagen über das Wärmetransportverhalten im Untergrund nur getroffen werden können, wenn alle hydraulischen und thermischen Materialparameter als auch die hydraulischen und thermischen Randbedingungen am Standort hinreichend genau bekannt sind. Dies wird besonders ersichtlich, wenn man die Analyseergebnisse aus dem Großtankexperiment mit den Ergebnissen der beiden Feldstandorte vergleicht. Die Versuche im Großtank, die einen gut untersuchten bzw. bekannten Untergrund und ein dichtes Messnetz aufweisen, zeigen hervorragende Übereinstimmungen mit den numerischen Simulationen. Hier kann eine detaillierte 3D Simulation das Prognosepotenzial im Vergleich zu einfacheren analytischen Modellen erheblich verbessern. Dagegen sieht man an den zwei Feldstandorten (Bad Wurzach und Kilchberg), dass bei fehlenden Informationen eine aufwendige numerische Detailsimulation keine signifikante Verbesserung des Prognosepotenzials birgt.

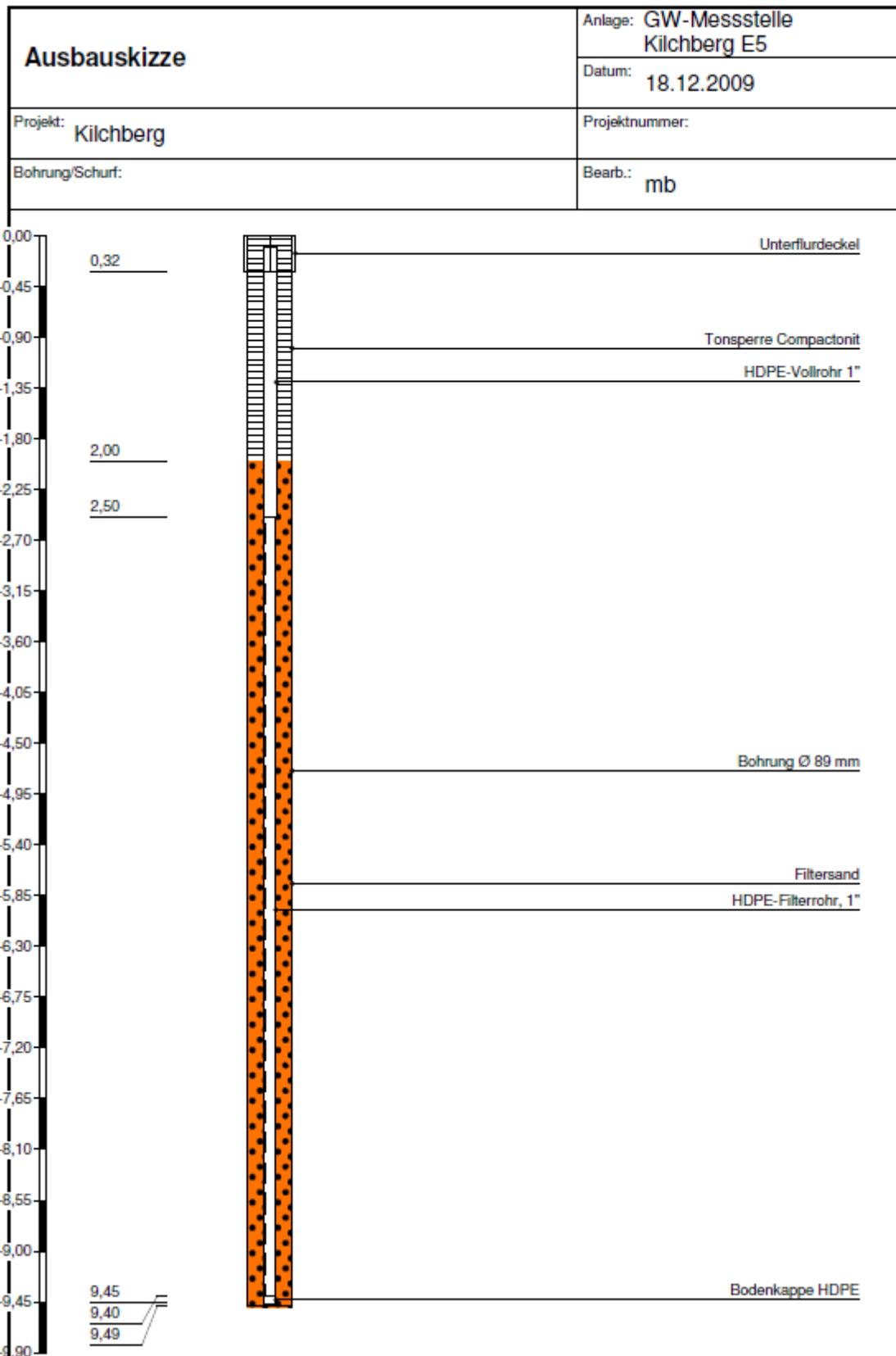
Als Fazit der durchgeführten Studie und Ergebnisse folgt, dass eine präzise Prognose über die Temperaturentbreitung durch die thermische Nutzung anhand geothermischer Anlagen nur durch die Unterstützung von detaillierten und aufwendigen Felduntersuchungen in Kombination mit Simulationsansätzen zu erfolgreichen und genauen Ergebnissen führt. Folglich kann keine flächenhafte Prognose mithilfe Tabellenwerken und/oder Übersichtskarten für Baden-Württemberg erfolgen, sondern sollte immer eine standort-spezifische Einzelfalluntersuchung durchgeführt werden.

## Referenzen

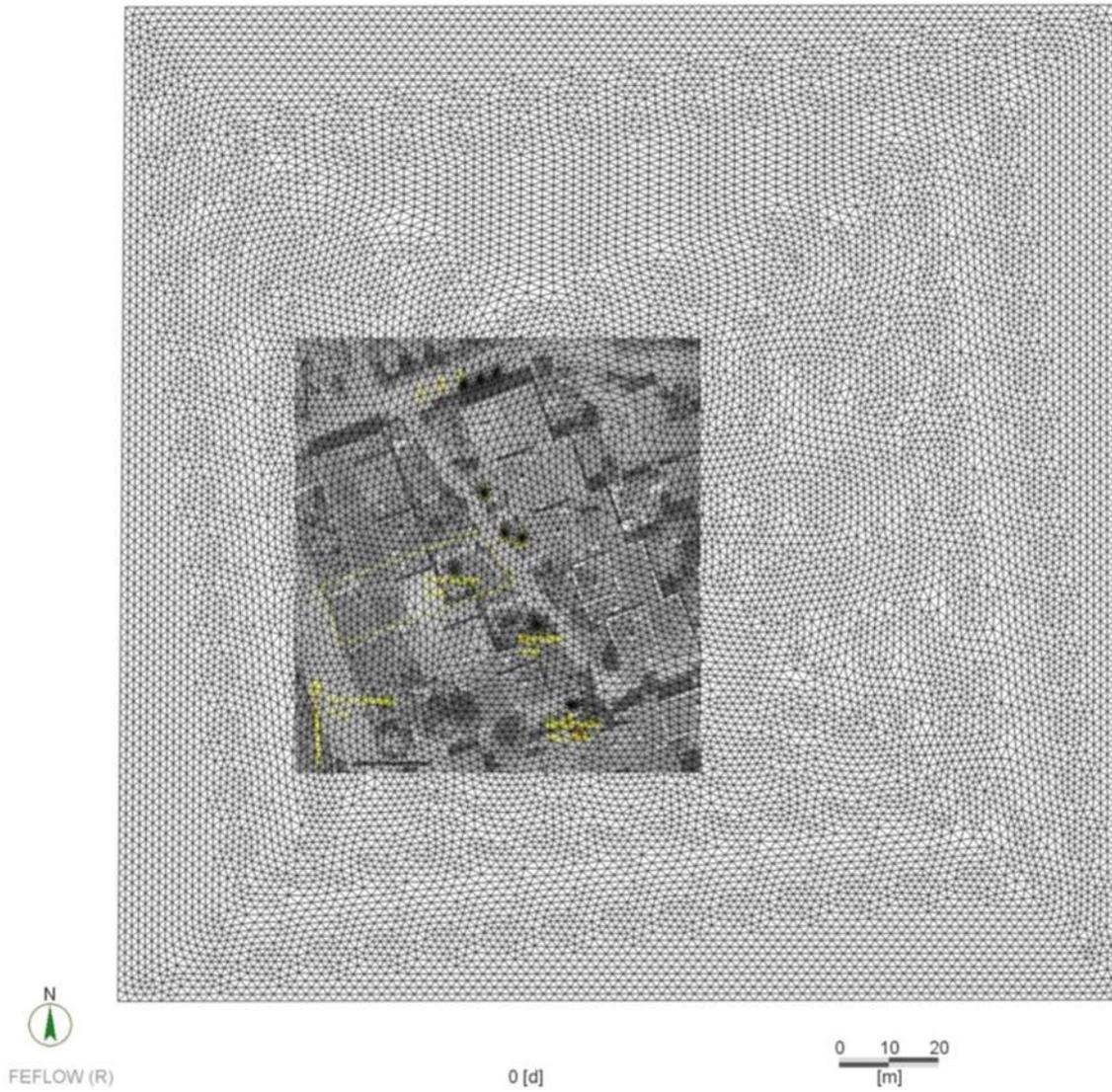
- Berner, M. S., 2011. Berechnung der Temperaturfahne von Grundwasserwärmepumpenanlagen. Diplomarbeit, Eberhard-Karls-Universität, Tübingen.
- Blum, P., Campillo, G., Kölbl, T., 2011. Techno-economic and spatial analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany. *Energy*, 36, 3002–3011.
- Blum, P., Campillo, G., Münch, W., Kölbl, T., 2010. CO<sub>2</sub> savings of ground source heat pump systems - a regional analysis. *Renewable Energy*, 35, 122–127.
- Bisch, G., Klaas, N., 2012 geomatrix.bw: Validierung von Erdwärmesondensimulationen zum Kühlen und Heizen im Nah- und Fernfeld mit Hilfe von geothermischer Testfelder. Abschlussbericht, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Brandstetter, G., 2011. Planung und Errichtung eines Testfeldes zur Messung der Kältefahne im Nahbereich einer Erdwärmesonde. Diplomarbeit, Eberhard-Karls-Universität, Tübingen.
- Carslaw, H.S. and Jaeger, 1959. *Conduction of heat in solids*. Clarendon Press, Oxford.

- Cless, B., 2012. Heat transport in very shallow open geothermal systems. Masterarbeit, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich.
- De Paly, M., Hecht-Méndez, J., Beck, M., Blum, P., Zell, A., Bayer, P., 2012. Optimization of energy extraction for closed shallow geothermal systems using linear programming. *Geothermics*, 43, 57-65.
- Diao, N., Qinyun, L., Fang, Z., 2004. Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. *International Journal of Thermal Sciences*, 43 (12), 1203–1211.
- Ebel, R. (1991). Hydrogeologisches Gutachten zur Grundwasserabsenkung für den Bau des Regenklärbeckens 4155 Gewerbepark Bad Wurzach. Bad Wurzach: Dr. Rudolf Ebel Büro für Geotechnik.
- Hähnlein, S., Kübert, M., Walker-Hertkorn, S., Bayer, P. und Blum, P., 2008. Rechtliche Rahmenbedingungen bei der Grundwasserbewirtschaftung: Die Rolle von Kältefahnen. *bbr - Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderausgabe Geothermie*: 14-20.
- Ingerle, K., 1988. Beitrag zur Berechnung der Abkühlung des Grundwasserkörpers durch Wasserpumpen. *Österreichische Wasserwirtschaft*, 40(11/12): 280-84.
- Kinzelbach, W., 1987. Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser. *gwf Wasser Abwasser*. R.Oldenbourg Verlag, München-Wien, pp. 313.
- Kleinert, K., 1976. Das Grundwasser im Kiesaquifer des oberen Neckartales zwischen Tübingen und Rottenburg. Dissertation, Eberhard-Karls-Universität, Tübingen.
- LUBW, 2009. Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen. Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart.
- Michopoulos, A., Kyriakis, N., 2009. Predicting the fluid temperature at the exit of the vertical ground heat exchangers. *Applied Energy*, 86 (10), 2065–2070.
- ÖWAV, 2009. Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds - Heizen und Kühlen. In: Ö.W.-u. Abfallwirtschaftsverband (Editor). Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- Rauch, W., 1992. Ausbreitung von Temperaturanomalien im Grundwasser. Dissertation, Universität Innsbruck, Innsbruck, 135 pp.
- Schollenberger, D., 1998. Beschaffenheit und Dynamik des Kiesgrundwassers im Neckartal bei Tübingen. Dissertation, Eberhard-Karls-Universität, Tübingen.
- Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., and Kohl, T., 2007, Numerical evaluation of thermal response tests. *Geothermics*, 36(2), p. 141-166.
- Sitzenfrei, R., 2007. Vereinfachtes numerisches Modell zur Beschreibung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser. Diplomarbeit, Leopold-Franzens-Universität, Innsbruck, 116 pp.
- Wallisch, J., 2010. Techno-economic and environmental assessment of an open-loop geothermal system in South-West Germany. Diplomarbeit, Eberhard-Karls-Universität, Tübingen.
- Weinszieher, R., 1984. Hydrogeologische und quartärgeologische Untersuchungen im Raum Bad Waldsee-Wolfegg-Bad Wurzach (Lkr. Ravensburg, Oberschwaben). Freiburg: Albert-Ludwigs-Universität.

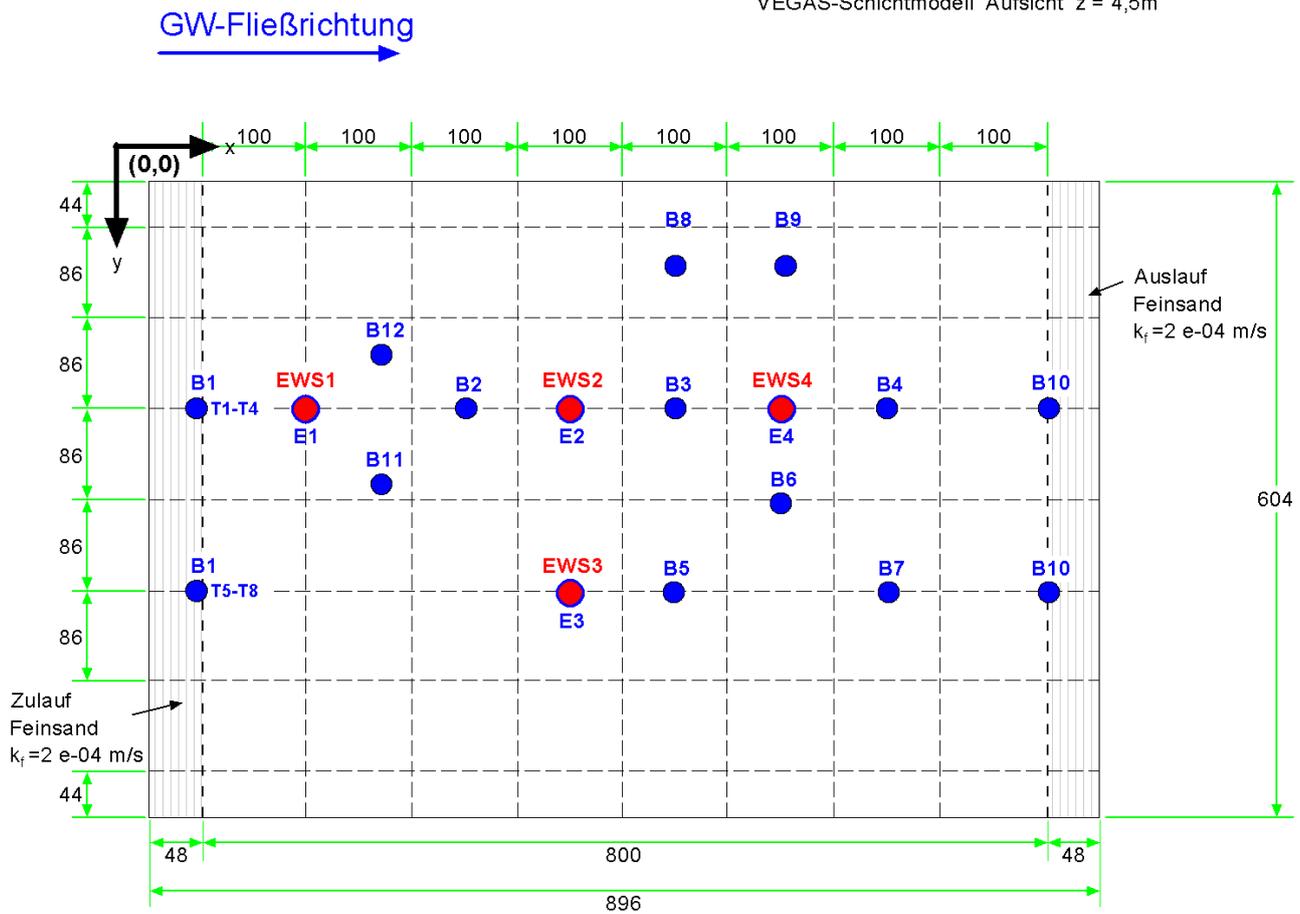
# Anlagen



Anlage 1: Pegelausbau am Beispiel des Pegels E5.



**Anlage 2: Horizontale Diskretisierung des FEFLOW-Modells für den Standort Kilchberg (Cless, 2012).**



B1 bis B12 Bohrungen für Temperaturmessung + E1 bis E4

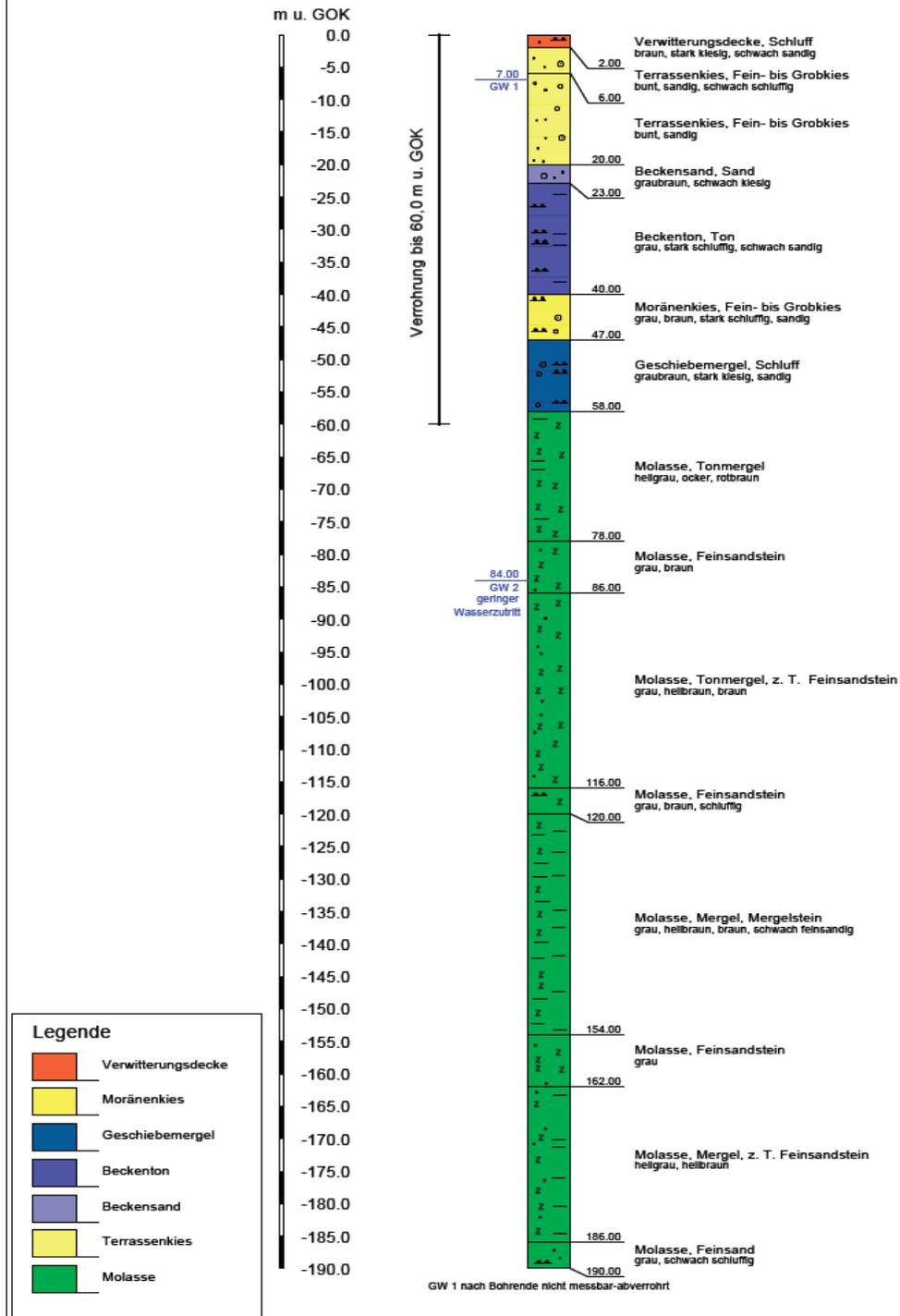
**Anlage 3: Lage der Erdwärmesonden und Temperaturmessstellen des geothermischen Großversuchs am Standort VEGAS (Bisch und Klaas, 2012).**

<b>BauGrund Süd</b> ErdEnergie Management GmbH Maybachstraße 6 88410 Bad Wurzach	<b>Erdwärmepohrungen BGS</b> 88410 Bad Wurzach	Az
		Anlage Nr. 3.1

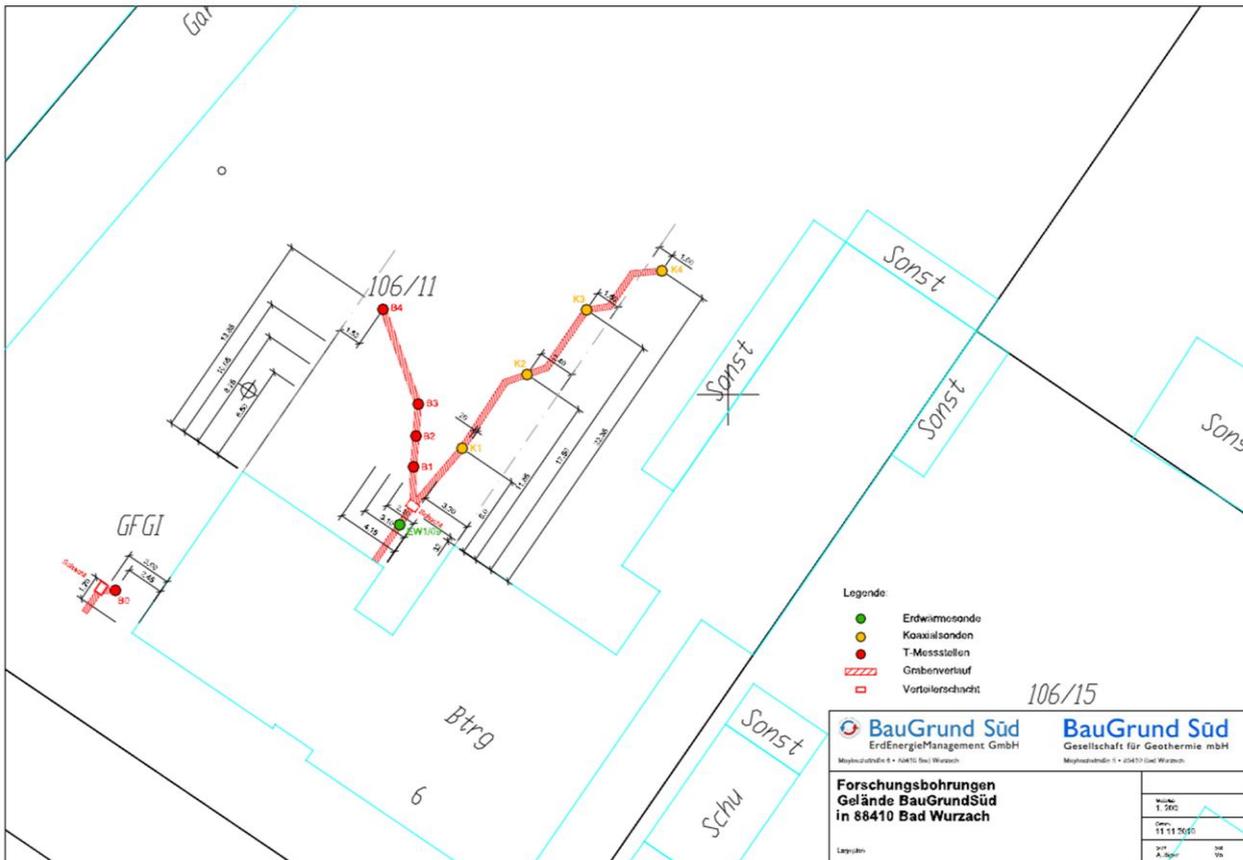
Maßstab d. H. 1:600

### EW1/09

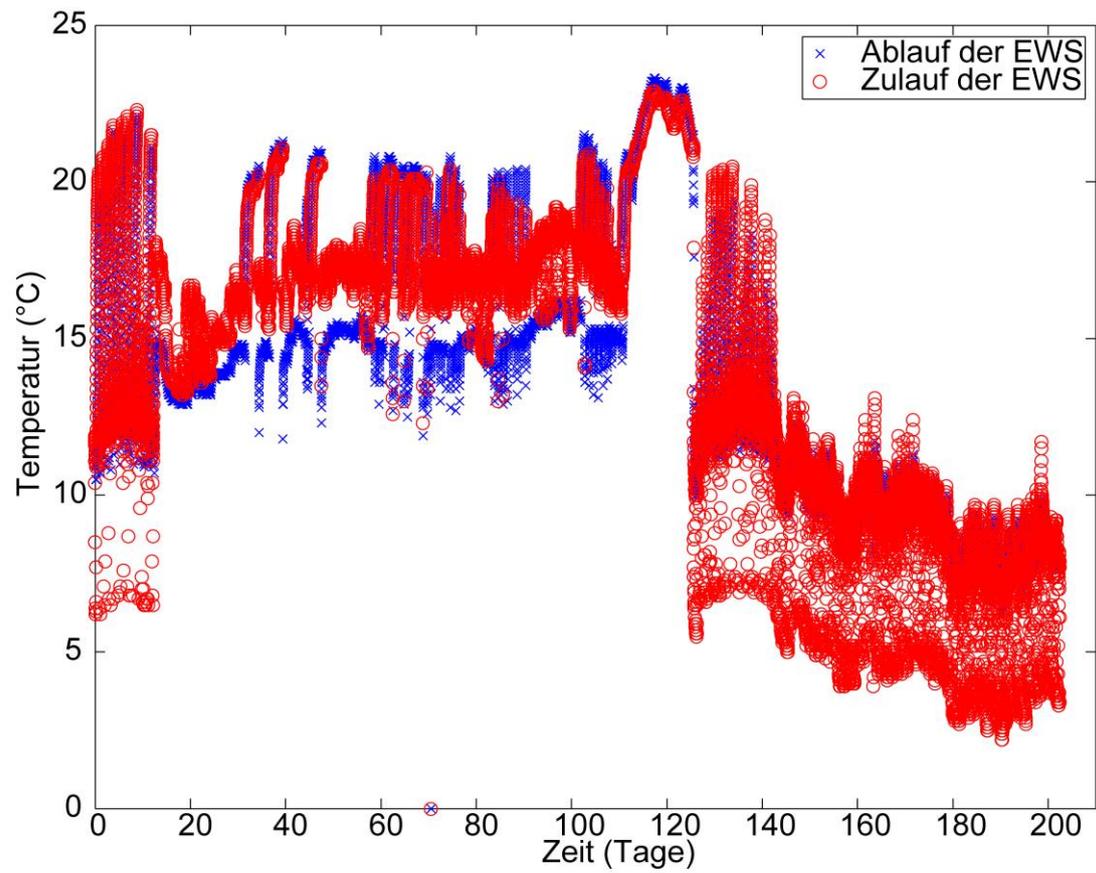
655 m ü. NN



Anlage 4: Bohrprofil der Erdwärmesonde (BauGrund Süd).



Anlage 5: Lageplan und Aufbau des Versuchs Bad Wurzach (Bisch und Klaas, 2012).



Anlage 6: Gemessene Wärmeträgerfluidtemperaturen am Standort Bad Wurzach.